



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學博士 學位論文

전기 추진 시스템의 운용 알고리즘 설계 및 에너지 효율성 분석

Operational Algorithm Design and Energy Efficiency Analysis of Electric
Propulsion System

指導教授 吳 珍 錫



2020年 2月

韓國海洋大學校 大學院

기관공학과
李 憲 碩

本 論文을 李憲碩의 工學博士 學位論文으로 認准함

委員長 蘇 明 玉



委 員 柳 熙 漢



委 員 吳 世 駿



委 員 吳 珍 錫



委 員 鄭 星 泳



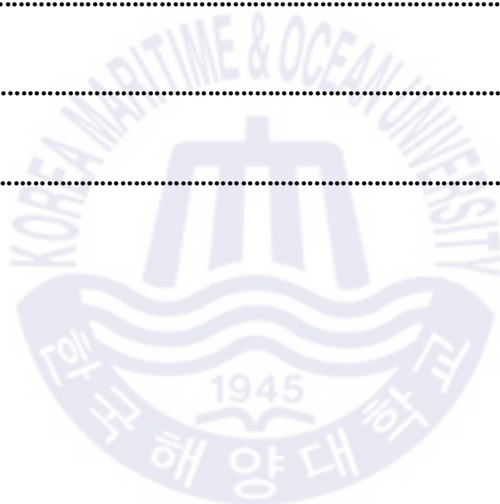
2019 年 12 月 30 日

韓國海洋大學校 大 學 院

목 차

제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 동향	3
1.2.1 국외 동향	3
1.2.2 국내 동향	5
1.3 연구 목표 및 내용	6
제 2 장 추진 및 전력 시스템	8
2.1 추진 시스템	8
2.1.1 기계식 추진 시스템	10
2.1.2 전기식 추진 시스템	12
2.2 전력 시스템	16
2.2.1 교류기반 전력 시스템	17
2.2.2 직류기반 전력 시스템	19
제 3 장 통합 기관 제어 시스템	21
3.1 선박 운항 데이터	22
3.2 전력 관리 시스템	25
3.2.1 발전기 부하분담 운전	27
3.2.2 부하 제어 및 관리	28
3.2.3 전력 관리 시스템 알고리즘	29
3.2.4 배터리 연계형 전력 관리 시스템	31
3.2.5 통합 기관 제어 시스템	34
제 4 장 가상선박 설계 및 모델링	41
4.1 가상선박 설계 및 모델링 방향	41
4.2 데이터 보관 및 다항식 회귀	44
4.2.1 데이터 보관	44
4.2.2 다항식 회귀	51
4.3 선박 선속-출력 모델	53
4.4 메인 엔진 연료특성 모델	59

4.5 발전기 연료특성 모델	60
4.6 추진 전동기 효율 모델	64
4.7 배터리 효율 모델	66
4.8 축 발전기 효율 모델	70
제 5 장 시뮬레이션	72
5.1 2,500 TEU 컨테이너선	73
5.2 6,800 TEU 컨테이너선	88
제 6 장 검토 및 고찰	99
제 7 장 결론	103
감사의 글	105
참고문헌	107

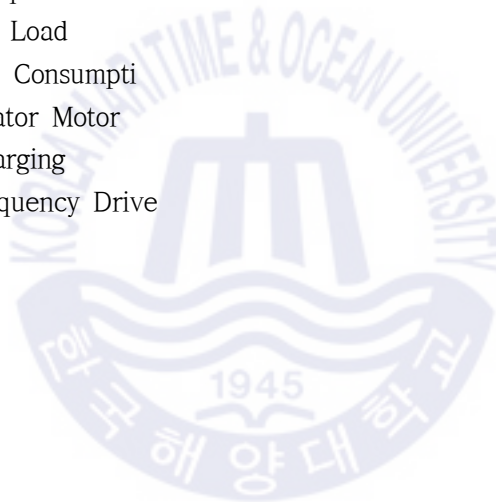


Nomenclatures

P	: 발전기 극수
N	: 회전수[rpm]
y_i	: 입력 값
\hat{y}_i	: 예측 값
n	: 데이터 개수
η_p	: 추진효율
η_{PM}	: 추진 전동기 효율
η_{VFD}	: 가변 주파수 드라이버 효율
η_{conv}	: DC/DC 컨버터 효율
η_{grid}	: 계통 연계 인버터 효율
k	: 비례상수
P_{IHP}	: 지시마력[HP]
P_{EHP}	: 유효마력[HP]
D	: 재화중량톤수[ton]
V	: 선속[knot]
C	: 애드미랄티 계수
R_f	: 마찰저항
R_t	: 저항
A	: 선박의 침수면적[m ²]
f	: Coefficient
L	: 선박의 길이[m]
R_1, R_2	: 배터리 내부 저항

AFE	: Active Front End
CFD	: Computational Fluid Dynamics
CPP	: Controllable Pitch Propeller
C-rate	: Current Rate
DWT	: Dead Weight Tonnage
MAPE	: Mean Absolute Percentage Error

MASE : Mean Absolute Scaled Error
FEP : Full Electric Propulsion
FPP : Fixed Pitch Propeller
HL : Heavy Load
HPS : Hybrid Propulsion System
IPS : Integrated Power System
PTH : Power Take Home
PTI : Power Take In
PM : Propulsion Motor
PMS : Power Management System
PTO : Power Take Out
RMSE : Root Mean Square Error
SEL : Ship Electric Load
SFOC : Specific Fuel Consumpti
SGM : Shaft Generator Motor
SOC : State Of Charging
VFD : Variable Frequency Drive



List of Tables

Table 1.1 IMO MARPOL emission control	1
Table 2.1 Characteristics of propulsion system configuration	10
Table 2.2 Operating configuration of hybrid propulsion system	13
Table 2.3 Relationship between generator speed and frequency	18
Table 3.1 Operation algorithm of simulation	21
Table 3.2 Input data list of simulation	22
Table 3.3 Load rate of generator load sharing start/stop	27
Table 4.1 Specification of the simulation target vessels	53
Table 4.2 Classification and characteristics of hull resistance	54
Table 4.3 Coefficient(f) according to speed and length of ship	55
Table 4.4 Admiralty coefficient(C)	56
Table 4.5 Coefficient(f) according to speed of simulation ship length	57
Table 4.6 Coefficient(f) according to speed of simulation vessel length(2)	57
Table 4.7 SFOC of G90ME-C10.5 Tier II mode	59
Table 4.8 Specification of battery module	67
Table 5.1 Input data of simulation	72
Table 6.1 Specification of simulation target vessels	99
Table 6.2 Simulation results of 2,500 TEU container vessel	100
Table 6.3 Simulation results of 6,800 TEU container vessel	101

List of Figures

Fig. 1.1	Emission control area	2
Fig. 1.2	COSSMOS diagram of DNV GL	4
Fig. 1.3	EMMATM energy diagram of ABB	4
Fig. 2.1	Mechanical propulsion system diagram	8
Fig. 2.2	Hybrid propulsion system diagram	8
Fig. 2.3	Full-electric propulsion system diagram	9
Fig. 2.4	Integrated power system diagram	9
Fig. 2.5	Composition of mechanical propulsion system	11
Fig. 2.6	Composition of hybrid propulsion system	13
Fig. 2.7	Propulsion system load ratio of 173.4k LNG carrier vessel	17
Fig. 2.8	Power system of MVDC vessel	20
Fig. 3.1	No.1 generator operation date of 2,500 TEU container vessel	23
Fig. 3.2	No.2 generator operation date of 2,500 TEU container vessel	23
Fig. 3.3	No.3 generator operation date of 2,500 TEU container vessel	24
Fig. 3.4	No.4 generator operation date of 2,500 TEU container vessel	24
Fig. 3.5	Control system of mechanical propulsion vessel	26
Fig. 3.6	Load sharing operation of Generator	27
Fig. 3.7	Flowchart of ideal power management system	30
Fig. 3.8	Block diagram of ideal power management system	30
Fig. 3.8	Flowchart of battery linked PMS(with hysteresis control)	32
Fig. 3.9	Block diagram of battery linked PMS(with hysteresis control)	33
Fig. 3.10	Flowchart of battery linked PMS(without hysteresis control)	33
Fig. 3.11	Block diagram of battery linked PMS(without hysteresis control)	34
Fig. 3.12	Block diagram of hysteresis control	34
Fig. 3.13	Block diagram of PTO mode	36
Fig. 3.14	Flowchart of PTO mode	36
Fig. 3.15	Block diagram of battery linked PTO mode ECS	37
Fig. 3.16	Flowchart of battery linked PTO mode	38
Fig. 3.17	Block diagram of battery linked PTO&PTI mode ECS	39
Fig. 3.18	Flowchart of battery linked PTO&PTI	40
Fig. 4.1	Diagram of simulation conceptual	42
Fig. 4.2	Simulation model hierarchy	43

Fig. 4.3	No.3 generator power of 6,800 TEU container vessel	44
Fig. 4.4	Result of linear interpolation	46
Fig. 4.5	Result of 5thorder polynomial interpolation	47
Fig. 4.6	Result of 6thorder polynomial interpolation	47
Fig. 4.7	Result of spline interpolation	49
Fig. 4.8	Front panel of data interpolation program	50
Fig. 4.9	Block diagram of data interpolation program	50
Fig. 4.10	Bisquare fitting algorithm & example of polynomial fitting	52
Fig. 4.11	Coefficient(f) according to vessel speed	57
Fig. 4.12	Admiralty coefficient of simulation target vessels	58
Fig. 4.13	Vessel speed – power curve	58
Fig. 4.14	SFOC of diesel engine	60
Fig. 4.15	SFOC of generator engine	61
Fig. 4.16	DC/DC converter efficiency	62
Fig. 4.17	SFOC of generator engine	63
Fig. 4.18	Electric propulsion system	64
Fig. 4.19	Propulsion system loss of diesel-electric	65
Fig. 4.20	Electric motor load and efficiency	65
Fig. 4.21	Efficiency of motor and motor driver	66
Fig. 4.22	Battery equivalent circuit and model flowchart	67
Fig. 4.23	Bi-directional grid inverter efficiency curve	68
Fig. 4.24	Efficiency curve according to battery model load ratio	69
Fig. 4.25	Block diagram of battery model	70
Fig. 5.1	Main engine power	73
Fig. 5.2	No.1 generator power	73
Fig. 5.3	No.2 generator power	74
Fig. 5.4	No.3 generator power	74
Fig. 5.5	No.4 generator power	74
Fig. 5.6	Number of generator operations and load rate	75
Fig. 5.7	Histogram of generator load rate	75
Fig. 5.8	Block diagram of fuel consumption simulation(1)	76
Fig. 5.9	Block diagram of fuel consumption simulation(2)	77
Fig. 5.10	Generator load rate of ideal PMS	78
Fig. 5.11	Number of generator operations at ideal PMS	78
Fig. 5.12	Block diagram of ideal PMS simulation	80

Fig. 5.13 Battery SOC	80
Fig. 5.14 Number of generator operations and load fact	81
Fig. 5.15 Number of generator operations and load rate	82
Fig. 5.16 Additional power of main engine and number of generator operations	82
Fig. 5.17 Battery SOC	84
Fig. 5.18 Number of generator operations and load rate	84
Fig. 5.19 Additional power of main engine	84
Fig. 5.20 Number of generator operations and load rate	85
Fig. 5.21 Additional power of main engine	86
Fig. 5.22 Battery SOC	87
Fig. 5.23 Number of generator operations and load rate	87
Fig. 5.24 Additional power of main engine	87
Fig. 5.25 Main engine power	88
Fig. 5.26 No.1 generator power	89
Fig. 5.27 No.2 generator power	89
Fig. 5.28 No.3 generator power	89
Fig. 5.29 No.4 generator power	90
Fig. 5.30 Number of generator operations and load rate	90
Fig. 5.31 Histogram of generator load rate	91
Fig. 5.32 Generator load rate of ideal PMS	92
Fig. 5.33 Number of generator operations at ideal PMS	92
Fig. 5.34 Battery SOC	93
Fig. 5.35 Number of generator operations and load rate	93
Fig. 5.36 Number of generator operations and load rate	94
Fig. 5.37 Additional power of main engine and number of generator operations	94
Fig. 5.38 Battery SOC	95
Fig. 5.39 Number of generator operations and load rate	95
Fig. 5.40 Additional power of main engine	96
Fig. 5.41 Number of generator operations and load rate	97
Fig. 5.42 Additional power of main engine	97
Fig. 5.43 Battery SOC	97
Fig. 5.44 Number of generator operations and load rate	98
Fig. 5.45 Additional power of main engine	98

Operation Algorithm Design and Energy Efficiency Analysis of Electric Propulsion System

Lee, Hunseok

Department of Marine Engineering

Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Ships have long been used as a means to transport large quantities of goods. Most modern ships have propulsion systems equipped with low-speed diesel engines, steam turbines, or gas turbines. However, the demand for eco-friendly ships and smart ships is increasing owing to rising fuel oil prices. Furthermore, the regulations on ship emissions such as sulfur oxide and nitrogen oxide have led to the transition from existing mechanical propulsion systems to hybrid and electric propulsion systems. Since the early 20th century, countries such as the U.S.A. and Russia have been applying electric propulsion technology to commercial vessels.

Since the development of electric power technology, research has been underway to equip ships with equipment such as batteries and shaft generator motors. Various vessel propulsion systems and operation modes have been developed due to the development of such equipment and environmental regulations.

In this paper, we compared and analyzed the energy efficiency of hybrid power and propulsion systems in container vessels. Power management systems compatible with existing mechanical propulsion systems are not applicable in the case of hybrid powered propulsion systems. Therefore, this paper proposed a suitable operation algorithm for a hybrid powered propulsion system. For energy comparison and numerical analysis, a ship-power model, main engine fuel characteristic model, generator fuel characteristic model, propulsion motor efficiency model, shaft generator

model, and battery efficiency model were developed. The proposed integrated engineering control algorithm was applied to verify the energy efficiency through simulations.

The operation data of an actual container ship was used to compare the energy efficiency for different configurations of the ship power and propulsion system. Furthermore, a comparative analysis of the energy efficiencies of the propulsion and power systems was performed via simulation

KEY WORDS: Hybrid power system, Hybrid electric drive, Hybrid propulsion system, Specific fuel oil consumption, Shaft generator motor, Propulsion motor



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

대량의 화물을 운송하기 위하여 오래전부터 선박을 이용한 해상운송 기술이 발전해 왔다. 그 결과 선박을 이용한 물류이송 시장은 지속적인 세계 경제의 성장에 따라 선박과 선박용 추진기관의 대형화를 야기하였다. 그리고 과거 증기터빈을 이용한 외연기관 기반의 추진 시스템은 내연기관의 발달로 저속 디젤엔진을 탑재하여 운항하고 있다. 그러나 최근 선박으로부터 발생하는 배출가스(이산화탄소, 황산화물, 질소산화물 등)의 문제가 대두되면서 친환경·고효율 선박에 관한 관심이 증가하고 있다. 이에 따라 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO) 및 해양환경보호위원회(Marine Environment Protection Committee, MEPC)에서 이산화탄소 배출량 감축을 위하여 에너지 효율 지수(Energy Efficiency Design Index, EEDI) 및 운항선박의 에너지 효율 관리 계획(Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP) 등을 제시하여 지속해서 배출가스 규제 및 환경보호를 위한 제도를 강화하고 있으며, 배출가스 통제 지역(Emission Controlled Area, ECA) 또한 점차 확대될 예정이다[1-8].

Table 1.1 IMO MARPOL emission control

Regulatory substance	Area	Year									
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
NOx	NOx ECA	TierII			TierIII						
	All Area			TierII							
SOx	SOx ECA	1.0%		0.1%							
	All Area					3.5%			0.5%		
CO2	All Area	Phase 0		Phase 1	(Shipbuilding contract after 13 years)				Phase 2		

급격하게 증가하고 있는 화석연료의 소비량 및 가격과 환경오염에 대한 인식의 증대로 향후 건조되는 선박은 배출가스 환경 규제를 만족하면서 운항비용 또한 절약 가능한 친환경·고효율 선박으로 건조될 것으로 보인다.

친환경·고효율 선박에 대한 조선 산업은 최근 제4차 산업혁명에 발맞추어 스마트 자동화 기반의 자율 운항 선박(Maritime Autonomous Surface Ship, MASS)에 관한 관심 및 연구의 증가와 함께 발전하고 있다[11,12]. 이에 따라 환경적인 요인과 스마트 자동화 기반의 자율 운항 선박의 필요성 증가와 같은 복합적인 이유로 전기식 추진 선박에 많은 관심을 보이며, 이에 따라 전기 추진 시장의 규모 또한 점차 확대되고 있다[13,14].

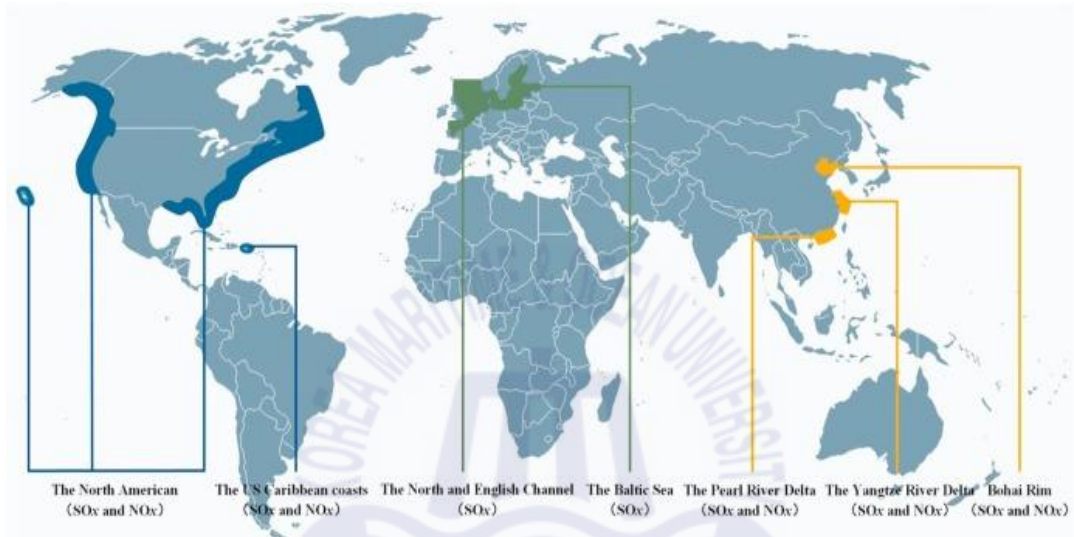


Fig. 1.1 Emission control area[9, 10]

전기식 추진 시스템 선박은 기계식 추진 시스템 선박보다 건조 실적 및 역사가 짧고, 추진 시스템 구성의 자유도가 높아 기계식 추진 시스템에 비하여 선박을 설계 및 건조할 때 어려움이 있다. 그런데도 전기 추진 선박은 연료비 절감, 운전 효율성 향상, 정비요소 감소, 자동화 시스템의 적용으로 운용인력 감소 등의 많은 이점을 가진다. 따라서 추후 건조되는 신조 선박의 추진 시스템으로 전기 추진 시스템의 탑재 비율이 점차 높아질 것으로 생각한다. 특히 군함과 같은 특수선에서는 하이브리드 전기식 추진 또는 통합 전력 시스템에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다[15-17]. 한편, 중-대형 선박인 상업용 선박에 적용된 사례는 특수선과 비교하면 미비한 편이다.

1.2 연구 동향

1.2.1 국외 동향

현재 운항 중인 선박의 보조 전원 또는 주전원으로 배터리를 적용한 선박은 덴마크, 노르웨이, 네덜란드 등의 해양 선진국 위주로 설계 및 운항되고 있다. 노르세 베리타스(det norske veritas & germanischer lloyd)에 따르면 에너지 저장 장치(Energy Storage System, ESS) 중 하나인 리튬계열 배터리가 선박의 주전원 혹은 보조 전원으로 사용된 선박은 2018년 3월 기준으로 약 180척 이상으로 조사되었으며, 추후 건조 중인 선박을 포함하면 점진적으로 늘어날 것으로 전망하고 있다.

전기식 추진 시스템은 발전기 또는 발전기와 배터리를 함께 사용하여 추진 장비인 전동기에 전력을 공급하거나, 배터리 또는 연료전지 등을 주-전원으로 사용하여 엔진-발전기를 운용하지 않고 선내 필요 전력 및 추진 전동기의 소요 전력을 모두 공급할 수 있다. 이러한 완전 전기 추진 시스템은 점차 확대되고 있는 배출 통제 지역(Emission Controlled Area, ECA)에서 배출가스 규제를 만족하며 운항이 가능하다[18,19]. 전기식 추진 관련 해외 연구동향은 다음과 같다.

일본의 미쓰비시 중공업에서는 일본 해사 협회의 지원을 받아 세계 최초 자동차 운반선에 하이브리드 전력 시스템을 적용한 ‘Emerald Ace’를 건조하였다. ‘Emerald Ace’는 160kW의 태양광발전 시스템 및 2.2MWh의 리튬이온 배터리를 적용하여 항해 중 태양광 발전 시스템으로 배터리를 충전한다. 충전된 배터리는 선박이 정박 중일 때 디젤 발전기를 사용하지 않고 배터리만으로 선내에 필요한 모든 전력을 공급하므로, 항구에서 배출가스의 발생이 거의 없도록 하였다. 자체적인 보고에 따르면 10% 이상의 이산화탄소 저감 효과를 가진 것으로 확인된다.

노르웨이에서는 세계 최초, 배터리만으로 운항 가능한 완전 전기 추진 시스템의 대형 여객선인 ‘Ampere’호를 2015년에 건조하여 운항하고 있다. ‘Ampere’호는 diesel-electric 추진 시스템 및 1,040kWh의 배터리를 탑재하여, 정기적으로 Oppedal과 Lavik 항구 사이를 하루 약 30회 정도 운항한다. 배터리의 충전은 부두에서 승객과 차량이 승차 또는 하차하는 약 10분 동안 충전하여 활용한다.

해양선진업체인 노르세 베리타스, 롤스로이스(Rolls-Royce) 및 ABB에서는 자체 개발

COSSMOS_pden_012.plv

COSSMOS_PEN_012.plv

PHE, Exotic

PHE, Control

PHE, Flow Transportation

Shifting the focus from components to systems allows for optimal design and operation solutions. The use of advanced computer-based analytics can ensure high quality and accuracy of results. This is the philosophy behind advisory services with DNV GL COSSMOS.

Fig. 1.2 COSSMOS diagram of DNV GL



Fig. 1.3 EMMATM energy diagram of ABB

Fig. 1.2는 노르세 베리스타에서 개발하여 사용 중인 ‘COSSMOS’이며, Fig. 1.3은 ABB사에서 개발한 EMMATM의 사용자 화면이다. 프로그램은 선박의 주요 장비 사양에 대해 모델링하여 선박 건조 단계에서부터 에너지 효율 분석 및 평가할 수 있도록 한다. 이를 통하여 선내 에너지 소비량 및 배출가스 배출량을 예측할 뿐만 아니라, 에너지 효율 개선에도 적극적으로 사용하고 있다. 이를 이용한 시뮬레이션을 결과 실제 선박의 에너지 소비량과 예측 오차율은 약 15~25%로 알려졌다.

1.2.2 국내 동향

국내의 경우 대형 조선소를 주축으로 이중연료(dual fuel) 엔진을 탑재하거나 추진 전동기를 탑재한 선박의 건조에 박차를 가하고 있다. 그러나 주요 장비 및 설계에 있어 해외기술에 의존하고 있는 단계이다. 하이브리드 선박 및 LNG를 연료로 이용하는 선박에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있으나, 대부분의 전기식 추진 및 하이브리드 추진 선박에 관한 연구 및 적용은 소형 레저 선박, 어선 또는 해군 함정을 대상으로 활발히 진행되고 있다. 그리고 대형 상선에 대한 전기 추진 시스템 관련 연구 및 실적이 상대적으로 부족한 상황이다[19-22]. 아래는 국내 연구 사례를 나타낸다.

- 해양수산부에서 시행한 사업으로 전기 추진 시스템을 탑재한 연구 선박인 이사부호를 건조하여 해양과학연구에 활용 중
- 2015년, 국내 최초 연료전지 선박이 동남권-대경권 공동 수행연구로 개발됨
- 대한민국 해군, 하이브리드 및 전기 추진 함정의 신뢰성 확보를 위하여 다양한 시뮬레이션을 활용한 검증 방안에 관한 연구 진행 중
- 대우조선해양에서는 2019년 자체적으로 축 발전기(Shaft Generator Motor, SGM) 국산화에 성공하여 강화되고 있는 배출가스 규제에 적극적으로 대응하기 위한 박차를 가하고 있음

국내 연구사례를 보면 대형 상선에 대해서는 LNG 등의 연료를 이용한 이중 연료 추진 장비 탑재에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 해군의 경우 함정의 정속성 및 대잠수함능력 등의 작전수행능력 향상을 위하여 하이브리드 추진 시스템에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 하이브리드 추진 시스템에 대한 실적 및 운용경험

의 부족으로 주요 관련 기술을 해외에 의존하고 있다[23]. 이러한 해외의존도를 낮추기 위하여 시뮬레이션을 이용한 하이브리드 추진 시스템에 대한 검증에 대한 연구가 진행 중이다.

1.3 연구 목표 및 내용

기존 기계식 추진 시스템을 적용한 선박의 경우 추진 및 발전 시스템이 독립적으로 운용됐던 것과 달리, 전기식 추진 시스템의 경우 추진 시스템과 발전 시스템이 상호 연동되어 운영되어 진다. 따라서 기존 기계식 추진 시스템에 적용되는 전력 관리 시스템(Power Management System, PMS)의 적용은 적합하지 않다. 더불어 원동기-발전기만으로 운영되던 전력 시스템에 에너지 저장 장치인 배터리가 추가로 탑재되므로 이에 적합한 운용 시스템이 필요하다.

현재 전기식 추진 및 하이브리드 전력 시스템이 적용된 선박은 군함 및 해양조사선, 쇄빙선 등 특수선박이거나, 자동차 운반선, 연안 여객선 등 전력 부하의 변동이 작은 선박 위주로 적용되어 운용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 전력 변동성이 비교적 큰 컨테이너 선박에 하이브리드 전력 시스템 및 하이브리드 전기식 추진 시스템 적용에 따른 선박 선속-출력 모델, 메인 엔진 연비특성 모델, 발전기 연료특성 모델, 추진 전 동기 효율 모델, 축 발전기 모델과 배터리 효율 모델을 개발하고, 통합 기관 제어 알고리즘을 적용하여 에너지 효율성을 시뮬레이션을 통해 확인하고자 한다. 본 논문은 총 7개의 장으로 구성되며, 각 장은 다음과 같은 내용을 기술한다.

제 1장은 연구 배경과 국내·외 연구 개발 사례를 기술하며, 연구 목적 및 연구 방향, 그리고 본 논문의 구성에 대하여 설명한다.

제 2장은 선박 추진 및 전력 시스템에 대한 전반적인 내용으로, 기계식 추진 시스템과 전기식 추진 시스템의 특성을 비교 및 분석하여 기술한다.

제 3장은 기존 선박에 탑재돼 있는 선박 운용 알고리즘에 관하여 기술하고, 본 논문에 적용하고자 하는 선박 구성에 따른 전력 및 추진 시스템의 운용 알고리즘을 제안한다.

제 4장은 기존 기계식 추진 시스템과 전기식 추진 시스템의 에너지 효율을 비교하기 위하여 실제 선박의 운항 데이터를 기반으로 가상 선박 주요 장비의 제원을 설계한다.

더불어 실선 운항 데이터, 장비 제조사의 사양서 등을 활용하여 시뮬레이션 수행을 위한 모델을 구현한다.

제 5장은 3장에서 제안한 선박 구성시스템에 따른 운용 알고리즘과 4장에서 구현한 시뮬레이션 모델을 이용하여 실제 운항 선박과 가상 선박에 대한 에너지 효율 비교 시뮬레이션을 수행한다.

제 6장은 시뮬레이션 결과를 비교 및 분석하여 전기식 추진 시스템과 기계식 추진 시스템의 에너지 효율 및 주요 특징을 비교한다.

제 7장은 본 논문의 결론과 향후 과제에 관한 내용을 기술한다.



제 2 장 추진 및 전력 시스템

2.1 추진 시스템

선박의 추진 시스템은 구성에 따라 기계식 추진 시스템과 전기식 추진 시스템으로 나눌 수 있다. 전기식 추진 시스템은 완전 전기 추진 시스템(Full Electric Propulsion, FEP), 통합 전력 시스템(Integrated Power System, IPS) 및 하이브리드 추진 시스템(Hybrid Propulsion System, HPS)으로 나눌 수 있다. 각 추진 시스템에 대한 구성도¹⁾는 다음과 같다.

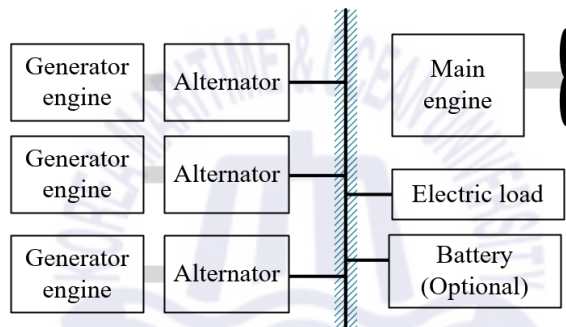


Fig. 2.1 Mechanical propulsion system diagram

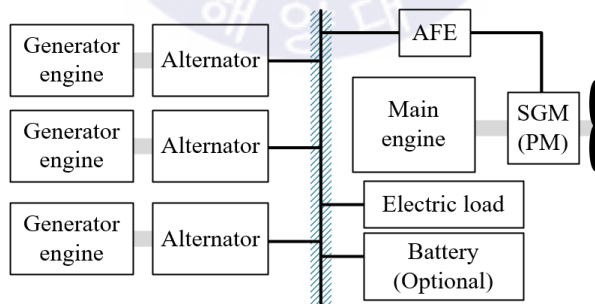


Fig. 2.2 Hybrid propulsion system diagram

1) AFE : Active Front End

SGM : Shaft Generator Motor

PM : Propulsion Motor

Fig. 2.1과 같은 기계식 추진 시스템은 전력 및 추진 시스템이 완전히 구분돼 있으며, 다수의 발전기를 이용하여 선내 필요 전원 및 추진 시스템을 구동하기 위한 보조기기에 전력을 공급한다.

Fig. 2.2와 같은 하이브리드 추진 시스템의 구성은 기계식 추진 시스템의 축계에 전동기를 추가로 탑재하여 축계 발전기 또는 추진 전동기로 활용할 수 있다. 전동기의 활용 방법에 따라 축 발전기(Power Take Off, PTO) 모드, 축 추진 전동기(Power Take In, PTI) 모드 및 전기 추진(Power Take Home, PTH) 모드로 나눌 수 있다. 축 추진 전동기 모드에서 추진 전동기만을 이용하여 선박의 최대속도 대비 비교적 저속에서 운용하는 것을 디젤-전기(diesel-electric) 모드라 하며, 주 추진기관과 함께 운용되어 가속능력을 높이거나 더욱 높은 출력을 내는 것을 부스트(boost) 모드라 한다.

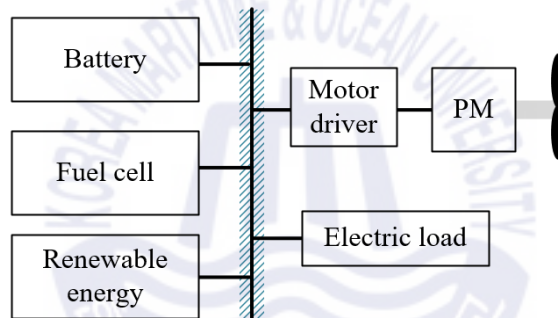


Fig. 2.3 Full-electric propulsion system diagram

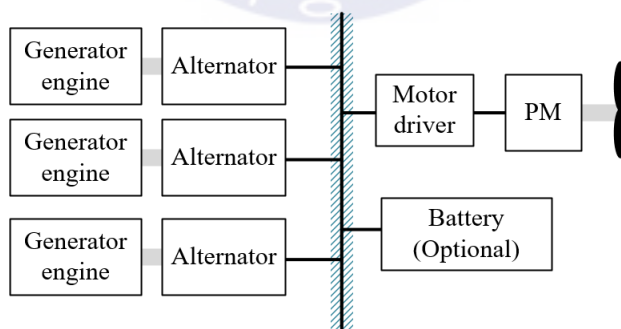


Fig. 2.4 Integrated power system diagram

Fig. 2.3과 같은 완전 전기 추진 시스템은 배터리 및 신재생에너지를 전력원으로 하여 전기에너지로 추진 전동기를 구동시켜 추진하는 방식으로, Fig. 2.2의 전기 추진 모드와 동작이 같으며, 배출가스가 발생하지 않는다. 그러나 이러한 완전 전기 추진 방식에 탑재되는 배터리는 연료를 이용하여 지속적으로 전력 생산이 가능한 원동기-발전기와 달리, 배터리에 저장할 수 있는 에너지에 한계가 있고, 부피 및 무게에 따라 저장할 수 있는 에너지의 밀도가 낮아 지속적인 전력 생산이 어렵다. Fig. 2.4와 같은 통합 전력 시스템은 원동기-발전기를 이용하여 선내 필요 전력뿐만 아니라 추진 전동기가 소비하는 전력을 공급한다. 선박 추진 시스템의 구성에 따른 특성을 간략히 정리하면 Table 2.1과 같이 나타낼 수 있다.

Table 2.1 Characteristics of propulsion system configuration

	Mechanical System	Hybrid System	Integrated Power System	Full-Electric Propulsion
구조의 단순함	단순함	복잡함	보통	보통
이중화 신뢰성	낮음	높음	비교적 높음	비교적 낮음
운용의 자유도	낮음	높음	비교적 높음	비교적 높음
보조 장비 필요성	높음	높음	비교적 낮음	낮음
저-부하 문제	높음	비교적 낮음	낮음	낮음
제어 특성	나쁨	비교적 좋음	좋음	좋음

2.1.1 기계식 추진 시스템

현재 운항 중인 대부분의 대형 상선은 전력과 추진 시스템이 분리된 구조로 되어 있는 기계식 추진 시스템으로 구성돼 있다. 이러한 분리된 시스템 구조는 상호 연관성이 낮아 선박 설계가 비교적 단순하다는 장점이 있다. 그러나 디젤엔진 또는 가스터빈을 갖는 선박의 경우, 주 추진기관의 저-부하 및 중-부하에서 원동기의 효율이 고-부하와 비교하면 악화되는 특성을 가진다. 더불어 디젤엔진의 경우 오랜 시간 낮은 부하율로 운전하게 되면 급기의 감소로 인한 불안전 연소 문제 등으로 인하여 수명주기에 좋지 않은 영향을 미치게 된다[24,25].

대부분 유조선 및 본 논문에서 대상으로 하고자 하는 컨테이너 선박의 경우 고정 피치 프로펠러(Fixed Pitch Propeller, FPP)를 적용한 1기-1축의 추진기와 4대의 같은 용량을 갖는 발전기가 탑재되어 운용된다. 이는 다수의 발전기를 탑재하여 발전기의 고장 및 탈락²⁾ 발전기가 정상 운전 중 갑자기 불특정한 원인으로 인하여 전력 연결이 끊어지는 현상으로 인한 사고에 대응하고, 앞서 기술하였던 저-부하의 문제를 일부 해결할 수 있기 때문이다. 본 논문에서 대상으로 하는 컨테이너 선박의 기계식 추진 시스템의 구성은 Fig. 2.5와 같으며, 기계식 추진 시스템의 특성은 다음과 같다.

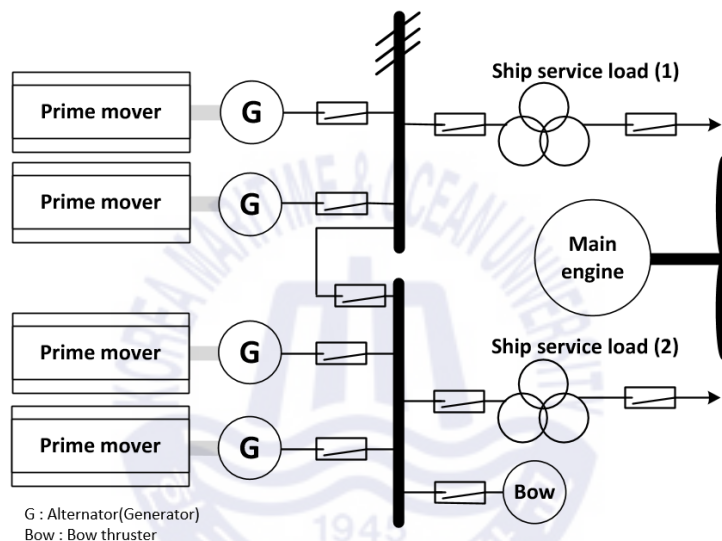


Fig. 2.5 Composition of mechanical propulsion system

- 배전반과 변압기는 선박의 발전기 용량 및 선내 부하의 종류에 따라 다르게 적용되나 일반적으로 440V, 6,600V, 11,000V의 전압이 사용된다.
- 하이브리드 및 전기식 추진 시스템과 비교하면 구조가 단순하고, 설계 및 건조 비용이 다소 저렴하다. 그리고 오랜 기간 관련 설계 기술의 축적으로 설계 값에 대한 신뢰도가 높다
- 주 추진기관이 프로펠러와 축계로 직접 동력을 전달하므로 동력 전달 효율이 높다.
- 역-토크의 생성이 어려움에 따라 정-역 회전방향의 전환이 어려우며, 저-부하로 오랜 기간 운용할 경우 유지 및 보수 비용 상승시킨다.

2) 발전기가 정상 운전 중 갑자기 불특정한 원인으로 인하여 전력 연결이 끊어지는 현상

2.1.2 전기식 추진 시스템

전기식 추진 시스템은 그 구성에 따라 하이브리드 전기식 추진 시스템 또는 완전 전기식 추진 시스템으로 구분된다. 하이브리드 전기식 추진 시스템의 경우 기계식 추진 시스템의 축계에 전동기를 연결하여 사용한다. 전동기를 축계에 연결할 경우 회전속도에 따라 직결 연결하거나, 기어박스를 통하여 회전속도를 감속시켜 연결하여 운용한다. 이러한 하이브리드 시스템은 장비의 구성에 따라 직렬형, 병렬형 또는 직-병렬 혼합형으로 세분화할 수 있다. 직렬형 하이브리드는 통합 전력 시스템(IPS)과 구성 및 운용방법이 같으며, 병렬형 하이브리드는 하나의 전동기를 이용하여 상황에 따라 추진용 또는 발전용으로 사용하는 시스템이다. 마지막으로 직-병렬 혼합형 하이브리드 구조는 발전용 발전전동기와 추진용 추진 전동기가 각각 탑재되어 운용되는 시스템이다.

본 논문에서의 전기식 추진 시스템은 대형 상선에 가장 적합한 병렬형 하이브리드(이하 ‘하이브리드’) 시스템에 관하여 기술한다. 하이브리드 추진 시스템은 추진과 전력 시스템을 하나의 시스템으로 구성하여, 선박의 운항 상황에 따라 전동기를 추진용 또는 발전용으로 운용할 수 있다. 이러한 하이브리드 추진 시스템의 특성을 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- 하이브리드 추진 시스템을 적용한 선박은 운항 상황에 따라 운용하는 장비를 선택적으로 사용하여 연료 효율성에 최적화한 운항으로 연료의 소비를 줄일 수 있다[26-30].
- 하이브리드 추진 시스템은 추진 장비를 다중화(redundancy)하여 선박의 안정성 및 신뢰성을 높일 수 있다[31].
- 선박의 저속 운항 중에는 전기 추진을 이용하면, 일정 시간 동안 배터리 또는 연료 전지 등을 이용하여 선내 필요 전력과 추진 전력을 모두 공급 가능하므로 배출가스 없이 운항 가능하다[25,30,32].
- 추진 전동기와 발전기는 전기적으로 연결되기 때문에, 기계식 추진 시스템과 달리 설치 위치가 자유로워 효율적인 공간 활용이 가능하다.
- 기계식 추진 시스템과 비교하면 장비의 설치 대수가 증가하며, 추가적인 장비 설치로 인한 건조 비용이 증가한다[33,34].

하이브리드 추진 시스템은 앞서 기술한 것과 같이 선박의 상태 및 상황에 따라 다양한 방법으로 운용할 수 있다. 각 운용 방법에 따른 특징 및 동력의 흐름은 Fig. 2.6과 Table 2.2와 같이 나타낼 수 있다.

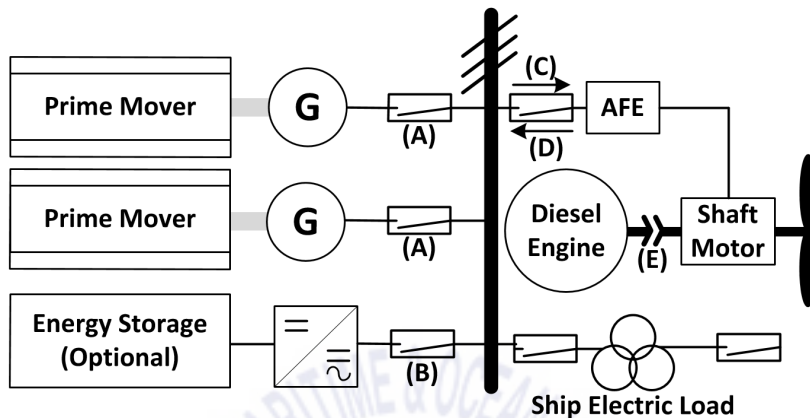


Fig. 2.6 Composition of hybrid propulsion system

Table 2.2 Operating configuration of hybrid propulsion system

Operation mode	A	B	C	D	E
General mode	use	not use	not use	not use	use
PTI diesel electric mode	use	not use	use	not use	not use
PTI boost mode	use	not use	use	not use	use
PTH mode	not use	use	use	not use	not use
PTO transit mode	not use	use	not use	use	use
PTO parallel mode	use	not use	not use	use	use

Fig. 2.6과 Table 2.2에서 PTI diesel electric mode의 운용 구성은 (A)접점, (C)접점을 사용함으로써 발전기를 통하여 선내 전력을 공급하며, 양방향 전력 변환장치(Active Front End, AFE³⁾)를 전동기 드라이버로 사용하여 추진 전동기로 선박의 추력을 얻는 운용방법이다.

3) 정류기의 다이오드를 IGBT로 대체하여 고조파를 크게 줄이고 재생 전력을 공급 장치로 다시 공급할 수 있는 양방향 전력 변환 장치

① 일반 추진 모드(General mode)

하이브리드 추진 시스템의 일반 추진 기능으로 기계식 추진 시스템과 운용방법이 같다. 즉, 추진과 전력 시스템이 독립적으로 운용되므로 발전기에서 생산되는 전력을 선내 부하(Ship Electric Load, SEL)에 공급하며, 추진력에 필요한 모든 동력은 주 추진기관인 디젤엔진으로부터 발생하는 동력을 이용한다. 이러한 일반 추진 모드의 경우 추진 및 전력 시스템에서 발전기와 메인 엔진 이외의 장비는 사용하지 않으므로 기계식 추진 시스템이 갖는 원동기(메인 엔진, 발전기)의 저-부하로 인한 낮은 연료 효율과 유지 및 보수의 문제점을 가진다.

② 축 추진 전동기 모드(PTI diesel electric mode)

하이브리드 추진 시스템에서 PTI mode는 축계에 연결된 추진 전동기(Propulsion Motor, PM)를 추진 동력원으로 사용하는 것이다, 일반적으로 PTI mode에 사용되는 추진 전동기의 최대 출력은 선박에 탑재되는 주 추진기관의 최대 출력보다 낮게 설계된다. 이는 설치 공간 및 건조 비용의 문제와 함께 추진 전동기를 탑재하는 주목적이 주 추진기관의 저-부하 운전에서의 문제를 보완하기 위한 보조 추진 장비로서의 역할이 크기 때문이다[34,35,36].

특수선 중 해군 함정의 경우 PTI mode의 적용이 적극적으로 이루어지고 있다. 이는 추진 전동기를 이용함으로써 큰 용량의 저속 디젤엔진으로부터 발생하는 수중 방사소음을 감소시켜 적의 잠수함으로부터 위치를 숨김으로 생존 가능성을 높일 수 있기 때문이다. 또한 추진 전동기를 이용하면 순항 시 연료비로 인한 운용비용을 줄일 수 있다 [34,35,40,41].

③ 축 추진 전동기 모드(PTI boost mode)

PTI boost mode는 축계에 연결된 추진 전동기와 주 추진기관이 함께 같은 방향으로 토크를 발생시켜 높은 추력을 얻는 시스템이다. 따라서 발전기는 선내 전력 부하뿐만 아니라 추진 전동기의 운용에 필요한 전력도 함께 공급해야 한다. PTI boost mode는 탑재되는 추진 전동기의 출력 용량에 따라 선박의 가속능력 또는 최고 속도에 영향을 미치게 된다. 따라서 짧은 시간 급격한 가속 능력이나 선박의 최고 속도가 중요하게

적용되는 함정에 주로 탑재되어 활용된다. 반면 대형 상선에서는 가속능력 및 최고 속력에 대한 요구보다는 경제성 및 환경오염 물질 배출 저감에 대한 요구가 높아 PTI의 booster mode의 기능을 활용하지 않는다.

④ 완전 전기 추진 모드(PTH mode)

PTH mode는 하이브리드 전력 시스템에 탑재돼 있는 배터리를 이용하여 선내 필요한 모든 전력을 공급할 뿐만 아니라 추진 전동기에 필요한 전력도 함께 공급한다. PTH mode에서 사용되는 시스템의 구성 및 운용방법은 완전 전기 추진 시스템과 같다. 이러한 구성은 별도의 원동기(메인 엔진 및 발전기)를 운전하지 않고 선박을 운용하므로 배출가스가 발생하지 않는다. 이에 따라 배출 규제 지역에서 별도의 배출가스 저감 장치인 선택적 환원 촉매(Selective Catalytic Reduction, SCR) 등을 구축하지 않고 배출가스 규제를 만족하며 운항할 수 있다. 즉, PTH mode에서는 입항 또는 출항 중 발생하는 배출가스를 줄이고, 정박 후 선내 필요한 전력을 배터리를 이용하여 공급하므로 별도의 발전기 가동이 필요 없다[42].

선박이 안전하게 입항 또는 출항하기 위하여 잦은 선박의 전진 및 후진 제어가 필요하나, 디젤엔진과 고정식 프로펠러를 탑재한 경우 축계의 정-역 방향전환은 디젤엔진을 완전히 정지시킨 후 시동부터 다시 운전해야 하므로 절차가 복잡하고 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 반면에 추진 전동기를 적용하면 축계의 정-역회전을 더욱 쉽게 운용할 수 있으므로 높은 운전성능을 가질 수 있다[43,44]. 그러나 배터리의 용량 및 충전상태에 따라 운항할 수 있는 시간 및 거리가 제한적이므로 대형 상선에서 완전 전기 추진방식의 적용은 어렵다.

⑤ 축 발전기 모드(PTO mode)

PTO mode는 주 추진기관의 동력을 추진 목적 외 다른 목적으로 이용하는 것이다. 하이브리드 추진 시스템에서 PTO mode는 주 추진기관인 디젤엔진 또는 가스터빈 등에서 발생하는 동력 일부를 축 발전기에 전달하여 선박 전력 부하에 전력을 공급할 수 있도록 한다. 그러나 선박의 내·외부 환경에 따라 주 추진기관의 회전속도가 변동하게 되면 안정적인 전력생산이 어렵게 된다. 따라서 장거리를 정속 운항하는 대형 상선이 소형선박이나 특수선보다 축 발전기의 적용이 유리하다[36]. 더불어 최근 양방향 전력

제어가 가능한 AFE 방식의 컨버터 발달로 PTO 및 PTI 적용이 더욱 유리하게 되었다. 이러한 PTO mode는 사용 환경에 따라 전환모드(transit mode)와 병렬모드(parallel mode)로 구분될 수 있다. Transit mode는 축 발전기에서 생산되는 전력으로 선내 모든 전력 부하에 공급 가능한 상황으로 축 발전기를 제외한 발전원을 사용하지 않으며, parallel mode의 경우 축 발전기 외에 추가적인 발전원을 가동하여 선내 전력 공급을 함께 수행한다.

2.2 선박 전력 시스템

선박에서의 전력 시스템은 선내에 필요한 전력을 생산하고 분배하는 시스템이다. 선박의 전력 시스템 특성상 육상과 달리 독립 전원 시스템으로 구성되며, 대부분의 대형 상선의 경우 다수의 원동기-발전기로 구성돼 있는 전력 시스템을 탑재하여 발전기의 고장 및 사고로 인한 정전(black out)이 발생하지 않도록 전력 시스템을 구성하는 것이 필수적이다.

선박 전력 시스템은 배전반 전력원의 유형에 따라 교류전력과 직류전력으로 구분될 수 있으며, 탑재되는 발전원의 종류에 따라 단일 또는 하이브리드 전력 시스템으로 구분된다. 현재 운항되고 있는 선박 대부분은 50Hz 또는 60Hz의 교류전력이 보편적으로 사용되고 있다. 이는 변압기를 이용하여 전압의 변동이 용이할 뿐만 아니라, 구조가 간단하여 유지 및 보수가 거의 필요 없기 때문이다. 더불어 이러한 교류전력은 저전압을 고전압으로 승압할 수 있으므로, 고전압 시스템을 이용하여 비교적 얇은 굵기의 전선을 이용하여 직류보다 적은 손실로 전력을 공급할 수 있다는 장점이 있다.

그런데도 최근 전력 변환 장치의 발달과 함께 전기식 추진 선박과 같은 특수선박 등에 직류전력의 적용에 관한 연구가 이루어지고 있다[45,46]. 이는 직류전력의 경우 전압과 전류의 위상차로 인한 역률이 없어 무효전력 없이 높은 전력 효율로 사용할 수 있기 때문이다. 또한, 추진 전동기 단일 부하의 소비 전력이 추진 전동기를 제외한 선내 모든 전력 부하의 합보다 크므로 직류전력을 적용하였을 때 이점이 더 많다. 이는 추진 전동기의 구동을 위하여 사용하는 추진 전동기 드라이버의 경우 드라이버 입력 전력이 교류전력일 경우 직류전력으로 전력변환 후 주파수 및 전압을 변동시켜 전동기의 속도 및 출력을 제어하게 되므로 전력 변환 손실이 더 크게 되기 때문이다.

2.2.1 교류기반 전력 시스템

19세기 시절부터 교류전력과 직류전력 중 전원 시스템의 표준을 정하기 위한 논의가 있었으며, 20세기 초 육상의 송-배전용 전력원은 교류전력을 표준으로 적용했다. 이는 변압이 직류전력에 비하여 쉽고 고전압을 이용할 경우 송-배전 때 발생하는 손실을 줄일 수 있으며, 전기 에너지를 회전 에너지로 전환하는 유도 전동기의 개발로 인하여 교류전력이 큰 이점을 가지게 되었기 때문이다. 이에 따라 이후 많은 종류의 전기장비가 교류전력 기반으로 개발되어 사용하고 있다.

디젤엔진 기반의 기계식 추진 시스템은 펌프(pump) 및 팬(fan)으로 구성된 많은 수의 보조기기가 필요하며, 이러한 보조기기는 회전 에너지가 필요하다. 이에 따라 선박의 전력 시스템에서도 가격이 저렴하고 유지 및 보수가 쉬운 유도 전동기의 사용에 더 적합한 교류전원이 적용되어져 왔다. Fig. 2.7에 나타내고 있듯이, 기계식 추진 시스템 기반의 액화천연가스(Liquefied Natural Gas, LNG) 운반선박의 추진 시스템의 전기 장비의 종류와 수는 높은 비율로 전동기가 차지하고 있다.

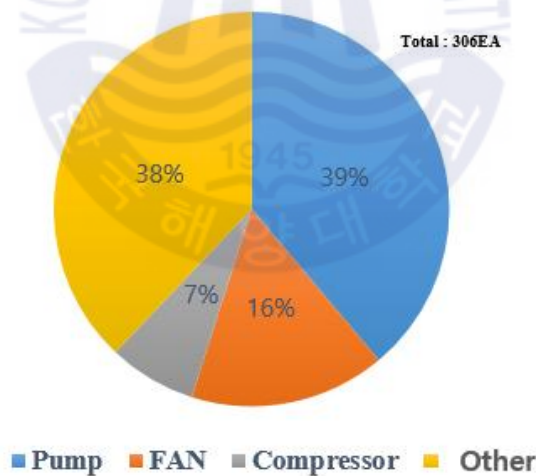


Fig. 2.7 Propulsion system load ratio of 173.4k LNG carrier vessel

선박의 전력 부하 중 가장 많은 수를 차지하는 유도 전동기의 경우 입력 전원의 주파수에 따라 회전수가 결정된다. 유도 전동기가 토크를 발생시키기 위해서는 고정자의 주파수(f)에 의한 동기 속도와 회전자 속도의 차이 즉, 슬립(slip)이 발생해야 한다. 만약 유도 전동기가 무-부하 상태인 동기 속도로 회전한다고 하면 유도 전동기의 회전속도는 식 (2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$rpm = 120f/P \quad (2.1)$$

유도 전동기의 극수(P)는 고정되어 있으므로 입력되는 주파수에 따라 회전속도가 결정된다. 따라서 교류전력 기반의 선박에는 발전원인 원동기(engine)-발전기(alternator)가 결합한 구조로 동기발전기가 탑재된다. 이러한 동기발전기에서 생산되는 전력의 주파수는 식 (2.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f(Hz) = \left(\frac{P}{2}\right) \times \left(\frac{N}{60}\right), \quad N[rpm] = 120f/P \quad (2.2)$$

식 (2.2)에서 발전기의 회전수(N)는 주파수(f)와 극수(P)에 의하여 결정되는 동기속도이다. 발전기는 설계할 때 극수가 정해지므로 교류전력에서 주파수를 일정하게 유지하기 위하여 정속도로 운전하게 된다. 즉, 선박 전력 시스템의 주파수에 따라 동기발전기의 회전수가 결정되므로, 부하율과 무관하게 원동기는 항상 같은 회전수의 유지가 필수적이다. 이에 따라 저-부하율에서 연료효율이 낮아지는 문제가 필연적으로 발생한다[32,47,48].

Table 2.3 Relationship between generator speed and frequency

Number of pole(P)	Generator RPM(N)	Frequency Hz(f)
4	1,800	60 Hz
	1,500	50 Hz
6	1,200	60 Hz
	1,000	50 Hz
8	900	60 Hz
	750	50 Hz

2.2.2 직류기반 전력 시스템

직류기반 전력 시스템은 교류기반 전력 시스템의 정속도 동기발전기의 적용에 따른 저-부하에서의 문제점과 부하 변동에 강인하게 대응하지 못하는 문제를 해결하기 위한 대안으로 적용할 수 있다. 직류전력 시스템은 원동기-발전기에서 생산되는 전압 및 주파수를 별도의 전력 변환 장치를 통하여 직류로 변환시키므로 교류 동기발전기로부터 발생하는 저-부하 운전 중 효율 저하 문제를 개선할 수 있다. 더불어 직류전력 시스템은 무효전력이 발생하지 않으므로 역률이 항상 '1'이며, 교류전력의 주파수 성분으로 인한 표피 효과(skin effect)가 없어 같은 전력을 송전할 때 교류전력과 비교하면 전선을 얇게 설계할 수 있으므로 전선으로 인한 무게 및 부피를 줄일 수 있다[49,42,50]. 또한, 주파수에 따른 위상의 개념이 없으므로 병렬운전 동기화를 위한 별도의 제어기와 장비가 필요하지 않다. 이러한 이점과 함께 전력전자 기술의 발달로 높은 효율의 컨버터 기술이 적용되기 시작하면서 직류기반 배전체계의 적용 가능성이 커지고 있다[51-54].

더불어 선박의 동력원 중 가장 큰 동력원인 주 추진기관이 전기식 추진으로 전환될 경우, 교류전원 기반의 전력 시스템에서는 추진 전동기의 속도제어 등을 위한 전동기 드라이버가 탑재되면 전력 변환 장치에서 발생하는 고조파 저감을 위한 많은 보조 장비의 탑재가 필요하다. 그러나 직류기반의 전력 시스템을 적용하면 전력 시스템에 커패시터 등의 설치로 문제를 해결할 수 있으므로 전력 시스템의 구조를 단순화하여 적용 가능하다[55].

또한 교류기반의 전력 시스템에서 동기발전기가 갖는 저-부하에서 효율이 낮아지는 문제를 개선할 수 있으며, 직류기반 전력 시스템의 선로에는 별도의 인덕턴스가 필요하지 않기 때문에 추진 전동기로 인한 높은 전류 부하 운용에 대한 강인성을 가질 수 있다[56-60].

이러한 이점과 함께 최근 직류 차단기와 직류전력 변환 장치의 기술 발전 및 신재생 에너지와 에너지 저장 장치 등의 연동을 통한 에너지 효율 향상 등을 고려하여 직류전력기반 배전 시스템을 갖는 전기 추진 선박이 조명받고 있다[61,62]

현재 적용되고 있는 직류전력기반 배전 시스템에는 Unregulated DC⁴⁾를 주전원으로 사용하는 경우가 많다. 이는 정속도 발전기 대신 가변속 발전기를 적용함으로써 발전기의 최적 운전점(optimal operating point)에 따라 운전할 수 있으며, 발전기의 종류에 따라 전압이 변동하는 배터리 및 연료전지와 같은 직류 발전원 사용에도 적합하기 때문이다.

정속도로 운전되는 동기 발전기를 이용할 경우 발전기로부터 발생하는 교류전력을 정류하여 직류전력으로 변환하여 사용하더라도 저-부하에서 얻을 수 있는 높은 연비특성을 사용할 수 없어 직류전력기반 배전 시스템의 이점을 활용할 수 없다.

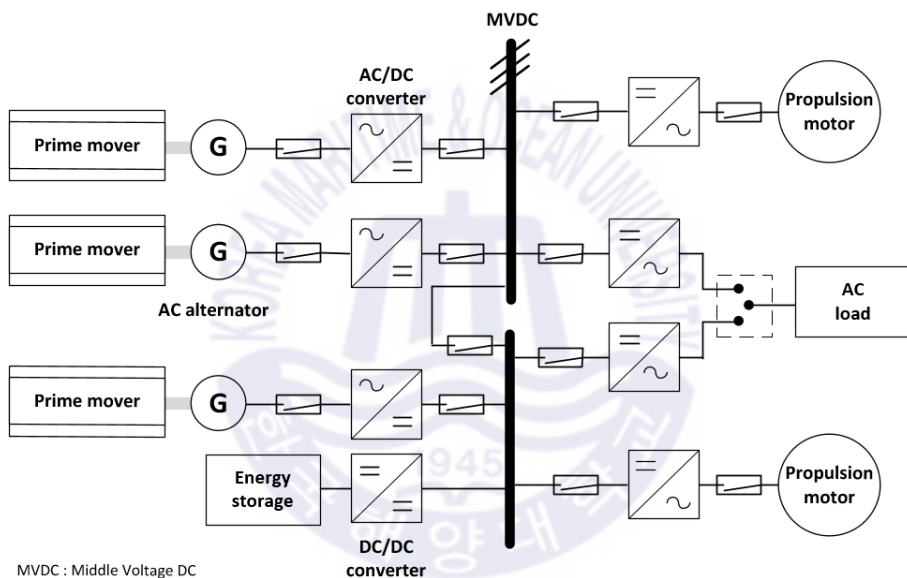


Fig. 2.8 Power system of MVDC vessel

4) Unregulated DC : 전압을 능동적으로 조절하지 않는 시스템을 뜻한다. 전압이 고정되어 있지 않더라도 어느 정도 범위 내에서는 전압이 조절된다. 예를 들어, 배터리의 출력 전압은 배터리와 부하의 상태에 따라 일정하지 않더라도 안정적인 전력의 공급은 가능하다. 만약, Unregulated DC를 주전원으로 사용하는 시스템에서 안정적인 전압 공급이 필요한 장비가 있으면, 별도의 전력 변환장치를 이용하여 특정 장비 또는 시스템에 전력을 공급할 수 있도록 한다.

제 3 장 통합 기관 제어 시스템

시뮬레이션 대상 선박의 에너지 효율성을 비교하기 위하여 선박의 추진 및 전력 시스템 변경에 따른 운용 알고리즘의 적용이 필요하다. 본 장에서는 2장에서 기술한 추진 및 전력 시스템의 구성에 따른 적합한 운용 알고리즘을 제안한다. 선박의 추진 및 전력 시스템 구성에 따른 시뮬레이션 적용 알고리즘은 Table 3.1과 같이 나타낼 수 있다.

Table 3.1 Operation algorithm of simulation

Item	Remark
User operation profile (Raw acquisition data)	Application of operation profile according to acquisition data(actual operating vessel)
Ideal power management system (Ideal PMS)	Application of KONGSBERG's power management system algorithm
Battery linked power management system(Battery linked PMS)	Proposal and application of power management system algorithm to improve energy efficiency by battery linkage with generator
Integrated engineering control system(ECS PTO mode)	Proposal and application of integrated control algorithm of propulsion and power management system by applying PTO mode
Integrated engineering control system(PTO&PTI mode)	Proposal and application of integrated control algorithm of propulsion and power management system by applying PTO & PTI mode
Integrated engineering control system(PTO&PTI mode) with battery system	Proposal and application of integrated control algorithm of propulsion and power management system by applying PTO & PTI mode with battery

시뮬레이션 대상의 가상선박에 적용하는 운용 알고리즘에 대하여 Table 3.1과 같은 순서로 제안한다.

3.1 선박 운항 데이터

본 논문에서는 선박의 에너지 효율성을 비교하기 위하여 실제 운항한 컨테이너 선박의 실측 데이터(raw data)를 활용한다. 컨테이너 선박의 데이터는 선박에 따라 5분 또는 10분 간격으로 주요 추진 및 발전 시스템에 대한 데이터를 취득하였다. Table 3.2는 실제 운항한 선박에서 계측한 데이터 목록이며, 에너지 효율성 분석을 위한 시뮬레이션의 입력 값으로 사용된다.

Table 3.2 Input data list of simulation

Acquisition data list	Unit
Measurement time	Intervals of 5min or 10min
Length overall & extreme breadth	m
Dead Weight Tonnage(DWT)	Ton
Max, main engine power	kW
Max. generator power	kVA
Generator installation number	EA
Design max. speed	knot
Main engine power	kW
No.1 generator load	kW
No.2 generator load	kW
No.3 generator load	kW
No.4 generator load	kW
No.1 generator on/off	1/0
No.2 generator on/off	1/0
No.3 generator on/off	1/0
No.4 generator on/off	1/0

본 절에서 나타내는 선박 운용 데이터는 실제 선박에서 수집한 시간에 따른 운용 데이터를 기록한 것으로, 선박에 탑재 및 자동화되어 운용되는 전력 관리 시스템 알고리즘과 다르게 운영된다. 이는 선박의 설계 및 건조 단계에서 탑재되는 전력 관리 시스템 알고리즘은 선박 주요 장비의 경년변화⁵⁾로 인한 효율 및 성능 감소에 적절하게 대응하지 못할 뿐만 아니라, 선박의 입항 및 출항, 화물의 선적 및 하역 등의 특수상황을 고려할 수 없어 갑작스럽고 큰 부하 변동에 대응하지 못하기 때문이다. 따라서 선박 운전자인 기관사는 선박의 특수 상황에서 수동으로 발전기를 제어하게 된다.

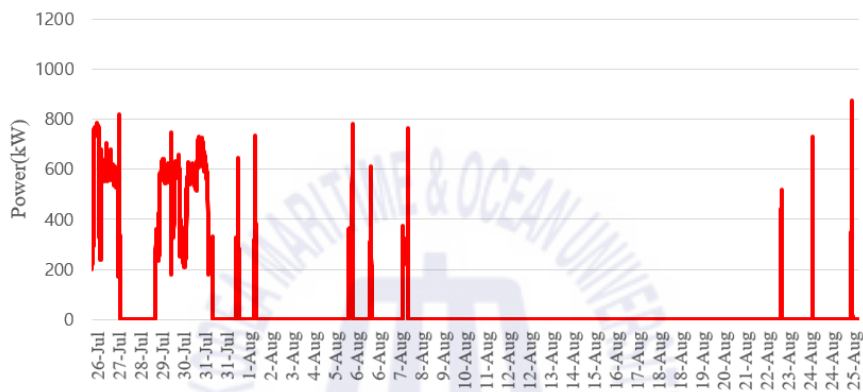


Fig. 3.1 No.1 generator operation date of 2,500 TEU container vessel

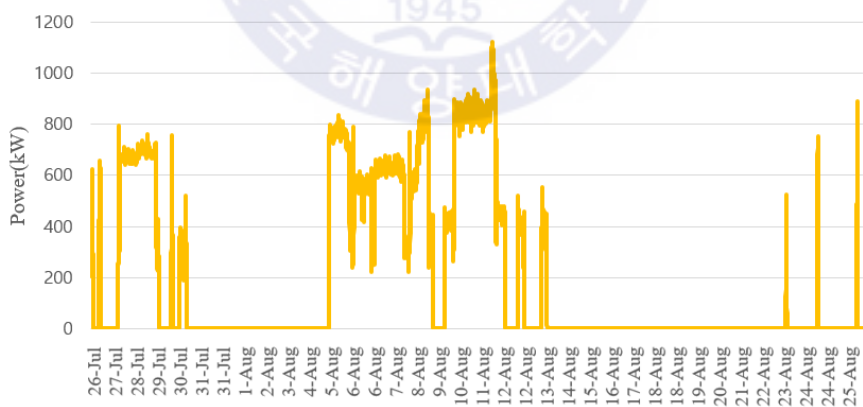


Fig. 3.2 No.2 generator operation date of 2,500 TEU container vessel

5) 장비의 상태가 세월이 지남에 따라 서서히 변화하여 특성이 애초의 값보다 변동하는 것

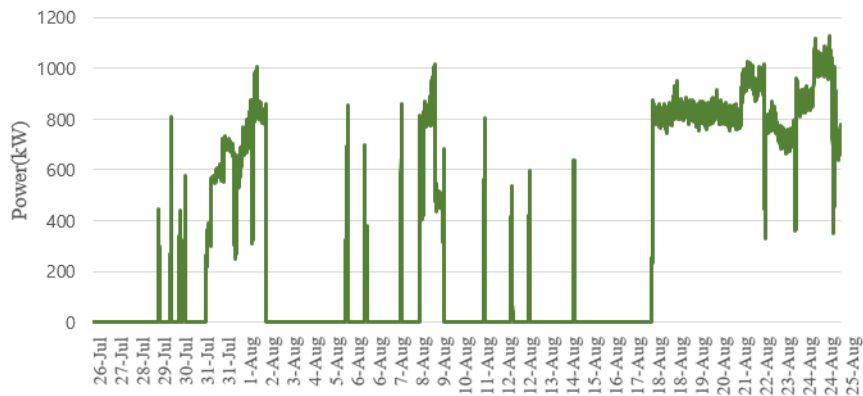


Fig. 3.3 No.3 generator operation date of 2,500 TEU container vessel

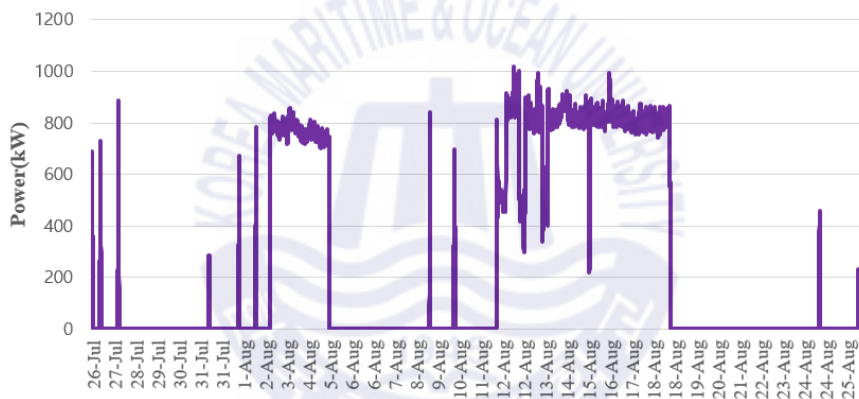


Fig. 3.4 No.4 generator operation date of 2,500 TEU container vessel

2,500 TEU 컨테이너 선박의 발전기의 약 30일간의 운용 데이터인 Fig. 3.1~3.4를 보면, 탑재된 발전기 한 대의 용량인 1,450kVA에 비하여 오랫동안 낮은 부하로 운영되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 발전기의 경년변화를 고려하여 부하 여유율을 높여 두었거나, 바우 스러스터 등의 중-부하 사용에 따른 발전기 병렬운전 등의 부하 분담으로 인하여 저-부하에서 운전하거나, 입항 또는 출항할 때 발전기의 탈락은 큰 위험을 초래할 수 있으므로 발전기를 2대 이상 운용하여 위험 상황을 예방하기 위함이다.

3.2 전력 관리 시스템

선박의 전력 관리 시스템(Power Management System, PMS)은 선박이 안전하게 항해할 수 있도록 선박 내 발전원과 부하를 제어 및 관리한다. 선박의 전력 시스템은 발전기의 고장 또는 사고 등으로 인한 정전(black out) 현상에 대비하기 위하여 다수의 발전기를 선내에 탑재하여 운용하며, 선박의 전력 부하 상태에 따라 적절한 발전기 운전대수를 선정하여 안정적으로 선내 전력 공급이 가능하도록 하면서 발전기의 효율적인 운용 또한 가능하도록 한다.

선박에 탑재되는 발전기의 수량 및 용량은 선박 전기 설비 기준에 따라 선내 주요 전기기기에 양질의 전력을 안정적으로 공급할 수 있도록 상용 발전설비를 설치하도록 권고된다. 그럼에도 불구하고 발전기의 용량에 대한 명확한 기준이 정립되지 않고 있다. 이에 따라 선박을 건조하는 조선소에서는 경험적으로 선내 전력 부하 분석(ship electric load analysis), 여유 예비 부하, 발전기의 경년변화에 따른 성능 저하, 그리고 과도상태의 단시간 과부하 내량⁶⁾(overload capacity)에 따른 전력 안전성 등을 복합적으로 고려하여 용량을 선정하고 있다.

선박의 전력 시스템은 일반적으로 선내 전력 부하 구성에 따라 2대~8대의 발전기를 탑재하여 운용된다. 본 논문의 대상 선박인 컨테이너 선박의 경우 같은 용량의 발전기를 4대 탑재하거나, 때에 따라 다른 용량의 발전기를 각각 2대씩 탑재하여 총 4대의 발전기를 탑재한다. 각각 2대씩 서로 다른 용량의 발전기를 탑재하는 것은 선박에 탑재되는 냉동컨테이너로 인한 전력 부하 사용범위가 넓거나, 추진 전동기와 같이 사용방법에 따라 전력 소비량이 크게 차이가 나는 부하를 사용하는 경우에 따라 발전기의 저-부하 구간에서 낮은 효율로 운전되는 것을 방지하기 위함이다.

서로 다른 용량의 발전기를 탑재하면 발전기 운용방법에 따라 저-부하 운전비율을 줄일 수 있음에도, 같은 용량의 발전기를 다수 탑재하는 것은 발전기 고장이 발생하였을 때 대기(standby) 발전기를 이용하면 선내 전력 공급이 쉬울 뿐만 아니라, 주요 소모품 여유분 확보에도 이점을 가지기 때문이다.

6) 발전기, 변압기 등의 전기 설비 기기가 전격 용량을 초과하는 과부하에 시간상으로 견딜 수 있는 수치.

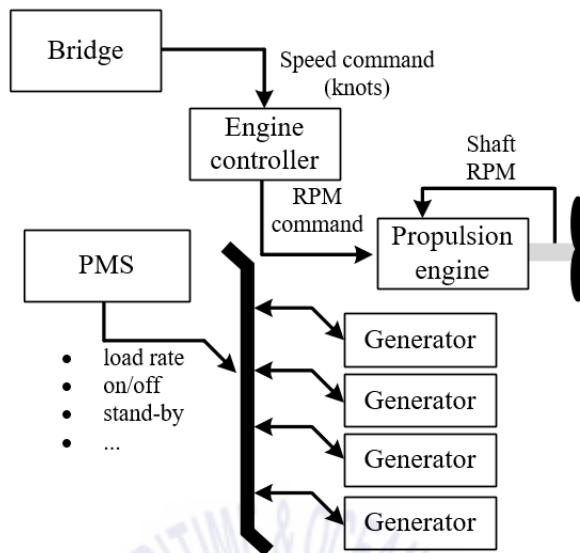


Fig. 3.5 Control system of mechanical propulsion vessel

기계식 추진 선박의 추진 및 전력 시스템은 상호 독립적으로 구성되어 있어 별도의 통합 기관 제어 시스템의 적용이 불필요 하나, 선내 소요 전력을 안정적으로 공급하기 위한 발전기 제어 시스템의 기능은 필수적으로 필요하다. 발전기 제어 시스템은 선내 전력 부하에 따라 선박에 탑재된 다수의 발전기를 운전 또는 정지하는 기능과 중-부하 (Heavy Load, HL)의 갑작스러운 기동으로부터 발전기가 탈락과 정전되는 문제 등을 방지하기 위한 부하 제어 기능 등을 수행한다.

발전기 제어 시스템은 선내 전력 부하에 따라 선내에 안정적으로 전력을 공급할 수 있도록 하고, 발전기의 효율적인 운용을 위하여 발전기 병렬운전 또는 정지 제어를 수행한다. 그리고 선내 부하 제어 기능을 수행하여 바우 스러스터 및 크레인과 같이 단일 장비로 선내 전력 소비량에 큰 영향을 미치는 장비 운용에 따라 발전기 운전 대수를 제어하고, 갑작스러운 전력 부하 변동 및 발전기 이상 등으로 인한 선박의 정전 현상을 막기 위한 비-중요부하(non-essential load) 제어를 수행한다.

3.2.1 발전기 부하분담 운전

발전기 부하분담 운전은 선내 전력이 안정적으로 공급될 수 있는 환경을 구축하기 위하여 발전기 부하율 및 운전 대수를 바탕으로 현재 전력 상태의 안정성을 판단하여 발전기의 병렬운전 또는 운전정지 기능을 수행한다. Table 3.3은 노르웨이 KONGSBERG 사의 전력 관리 시스템의 부하분담에 따른 발전기 시작 및 정지 부하율을 나타낸다.

Table 3.3 Load rate of generator load sharing start/stop

Number of generator connected	Start limit 1	Delay time 1	Start limit 2	Delay time 2	Stop limit	Delay time
1	82 %	30 sec.	88 %	10 sec.	-	-
2	85 %	30 sec.	90 %	10 sec.	65 %	15 min.
3	94 %	30 sec.	98 %	10 sec.	70 %	15 min.
4	-	-	-	-	75 %	15 min.

발전기의 부하분담 운전기능은 발전기의 유지보수에 따른 운전시간 등을 고려하여 우선순위 기준에 따라 발전기를 제어한다. Table 3.3에서 알 수 있듯이 선내에 필요한 전력을 안정적으로 공급하기 위하여 부하율에 따라 발전기를 급격하게 병렬 운전하거나, 비교적 시간적 여유를 가지고 발전기를 운전한다. 발전기 병렬 운전 중 운전하고 있는 발전기의 부하율이 같다고 하면, 발전기 운전 대수가 증가함에 따라 ‘start limit’의 값이 커지는 것은 적은 수의 발전기를 병렬 운전할 때보다 발전기의 운전 대수가 많을 때 여유 전력이 높기 때문이다.

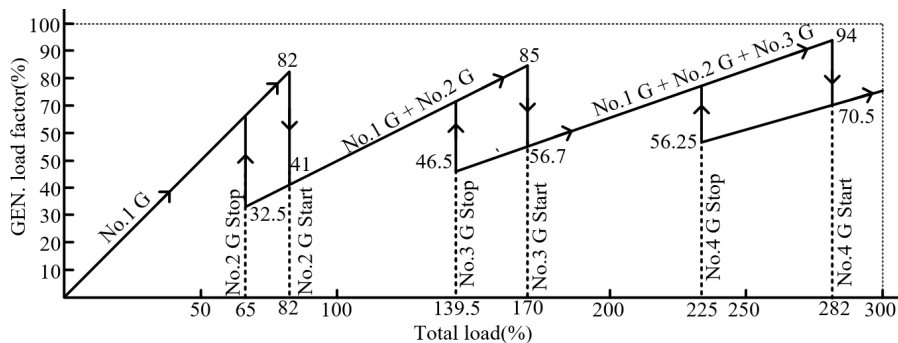


Fig. 3.6 Load sharing operation of Generator

Fig. 3.6은 Table 3.3에서 ‘start limit 1’ 을 기준으로 동작할 때 발전기 운전/정지 동작을 나타낸 것이다. ‘start limit 1’ 과 ‘start limit 2’ 의 부하율과 지연시간(delay time)의 차이는 갑작스러운 부하의 증가로 인한 전력의 불안전성을 낮추기 위하므로 높은 부하율에서 전력 부하의 증가에 더욱 강인하게 대응할 수 있도록 한다. 이처럼 발전기 부하분담 운전기능은 발전기의 부하율 및 선내 전력 부하에 따라 제어가 되며, 잦은 발전기의 운전/정비를 방지하기 위하여 ‘stop limit’ 에도 충분한 시간 지연을 설정함으로써 간헐적 부하에 대응하도록 히스테리시스 제어 동작을 수행한다.

그러나 위와 같은 발전기 운전/정지 제어 시스템으로 구현된 전력 관리 시스템은 갑작스러운 부하 증가로 인하여 발전기 병렬운전 후 전력 부하가 낮아져 안전상태가 되었음에도 ‘stop limit’ 기준 부하율까지 선박 전력 부하가 낮아지지 않아 장기간 효율이 나쁜 상태에서 운전되는 경우가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 선박의 운용자는 장기간 부하의 변동이 크지 않을 것으로 예상할 때 수동으로 발전기 운전 대수를 줄인다. 반면에 입항 및 출항과 같이 잦은 중-부하 사용이 예정되어 있을 때 운용자가 전력 안전성을 판단하여 수동으로 발전기 운전 대수를 조절한다. 즉, 선박 외·내부의 환경변화에 따라 운용자는 전력 관리 시스템의 자동제어 기능과 별개로 연료유효율과 전력 안전성을 판단하여 수동으로 발전기 운전 대수를 조작한다.

3.2.2 부하 제어 및 관리

선박의 종류 및 목적에 따라 중부하의 종류에 차이가 있으나, 대부분은 바우 스러스터, 크레인 등 짧은 시간에 큰 전력을 소비하는 장비가 주를 이룬다. 많은 선박의 경우에 중부하의 기동만으로 발전기의 급격한 과부하를 야기할 수 있기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 전력 관리 시스템은 사용자의 중-부하 사용 요청이 있을 때 부하 관리 시스템에 설정된 대상 중-부하 장비의 소요 전력과 현재 발전기 운전 상태에 따른 여유 전력을 비교한다. 이때 충분한 여유 전력이 확보되지 않으면 발전기를 추가로 운전하여 충분한 여유 전력을 확보한 후 중-부하를 기동하거나, 중-부하 종류에 따라 발전기 운전 대수를 정해두고 발전기 운전 대수가 맞으면 여유 전력이 다소 부족하더라도 중-부하를 기동한다. 만약 두 개 이상의 중-부하 기동 요청이 동시에 발생할 경우, 우선순위에 따라 차례로 여유 부하율을 계산하여 하나의 중-부하를 기동한 후에 남은 중부하의 기동 여부를 다시 판단한다.

갑작스러운 선내 부하 증가에 따른 발전기 과부하로 인한 배전반(switch board)의 주파수 및 전압 저하의 발생은 발전기 탈락으로 인한 정전현상을 일으킬 수 있다. 이러한 위급한 상황에서 전력 관리 시스템은 정전현상을 방지하기 위하여 직접 항해에 영향을 미치지 않는 비-중요 부하(Non Essential Load, NEL)를 정지시킬 수 있다. 비-중요 부하는 종류 및 중요도에 따라 선박 건조 과정에 정의가 되며, 부하 제어 시스템은 과부하로 인한 문제 발생 이전에 차례대로 전력을 차단한다.

3.2.3 전력 관리 시스템 알고리즘

3.1절과 같은 실제 운항 데이터를 보면, 전력 관리 시스템의 제어 알고리즘과 달리 입항 또는 출항할 때 항해 중에 사용한 발전기 운전 대수보다 한 대의 발전기를 추가로 운용하는 것을 확인할 수 있다. 이는 발전기의 경년변화에 따른 성능 저하를 고려하여 추가의 발전기를 운전하거나, 입항 및 출항과 같이 특수한 상황에서 자주 사용되는 바우 스러스터, 크레인 등으로 인하여 발전기가 운전 및 정지를 반복하는 것은 기계적 손상을 일으킬 수 있으므로 미리 발전기를 병렬 운전하기 때문이다. 이러한 이유로 선박에 탑재된 선박 전력 관리 시스템의 운용 알고리즘과 실제 사용자의 운용 데이터와는 다소 다른 운용 결과를 가져오기도 한다. 즉, 실제 선박에 적용되는 전력 관리 시스템은 선박의 운항 상태(정박, 항해, 입항 및 출항 등)를 알 수 없으므로 운용자가 직접 상황을 판단하여 발전기 운용을 제어하나, 시뮬레이션에 적용하는 전력 관리 시스템은 선박의 운항 상태를 고려하여 제어 동작을 수행하여야 한다. 따라서 시뮬레이션에 적용하는 전력 관리 시스템의 알고리즘은 정상상태만 고려한다. Fig. 3.7은 시뮬레이션에 적용하는 전력 관리 시스템을 알고리즘 흐름도를 나타낸다.

- 발전기 부하분담 운전/정지 부하율은 Table 3.3의 ‘start limit 2’의 값을 가지며 ‘delay time’은 고려하지 않는다.
- 입항 및 출항 중에는 입항 및 출항 시작 전에 운용하던 발전기 대수보다 한 대 더 운용하도록 하여 최소 두 대 이상의 발전기를 사용하도록 한다.
- 입항 및 출항 후 운항 모드가 달라질 때(정박 또는 항해) 두 대 이상의 발전기가 낮은 부하율에서 동작하는 것은 지양할 필요가 있다. 따라서 발전기 운용 대수를 Table 3.3에 따라 다시 결정하여 운용하도록 한다.

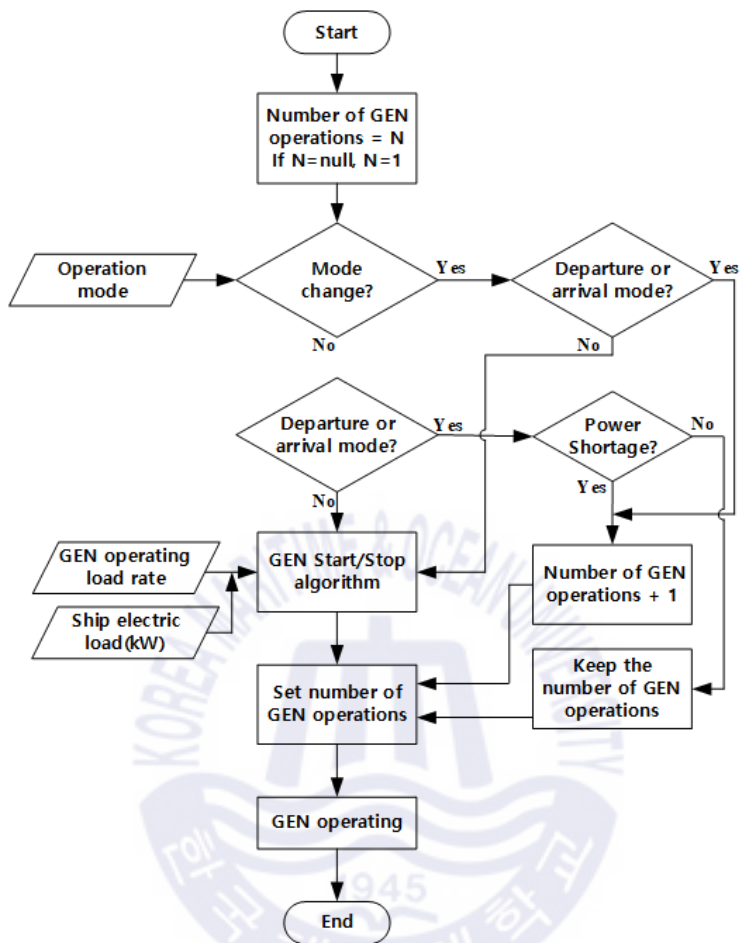


Fig. 3.7 Flowchart of ideal power management system

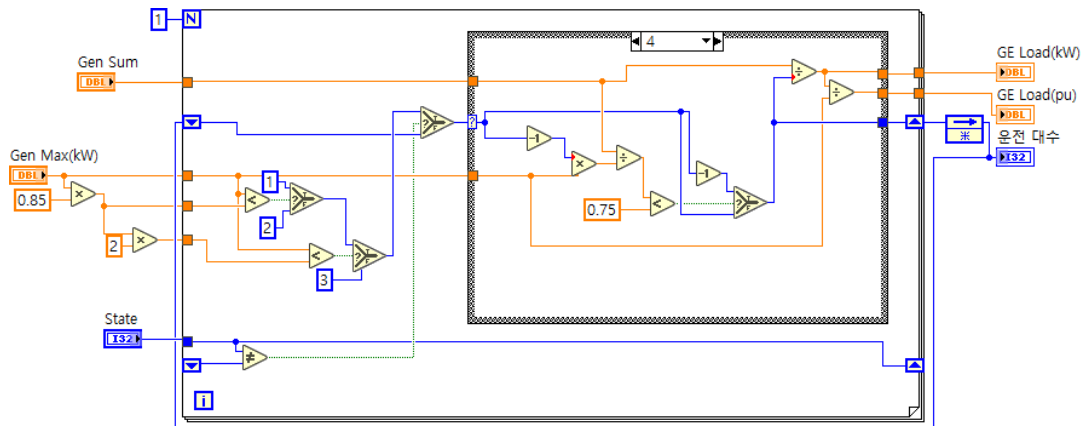


Fig. 3.8 Block diagram of ideal power management system

3.2.4 배터리 연계형 전력 관리 시스템

3.2.1절의 전력 관리 시스템의 발전기 제어 시스템은 같은 용량을 갖는 다수의 발전기만 운용하여 선내 전력을 공급한다. 그러나 배터리 연계형 전력 관리 시스템의 경우 발전기 외에 배터리가 추가되어 선내 전력 공급을 담당하게 된다. 배터리 연계형 전력 관리 시스템은 기존의 전력 관리 시스템과 달리 아래와 같은 특징을 가진다.

- 원동기-발전기로만 구성된 발전 시스템에 비하여 갑작스러운 전력 부하 증가에 따른 응답 속도가 빨라 강인한 대응이 가능하다.
- 배터리의 빠른 응답 속도로 인하여 발전기의 운전/정지의 부하율을 비교적 높게 적용하여 기존 전력 관리 시스템보다 에너지 효율을 높일 수 있다.
- 배터리 적용 및 관리를 위하여 추가적인 전력 변환 장치 및 제어기가 필요하다.
- 펌프와 같이 대부분의 전력 부하가 인덕턴스 성분으로 이루어진 전력체계에 배터리를 적용하면 전력품질 및 역률을 개선할 수 있다.

배터리 연계형 전력 관리 시스템을 적용할 경우 탑재되는 배터리의 용량(kWh)에 따라 에너지 효율 및 투자회수기간(payback period)은 많은 차이를 가진다. 본 논문에 적용하는 배터리 연계형 전력 관리 시스템의 배터리 용량(kWh)은 선박에 탑재되는 발전기 출력용량과 비슷한 용량으로 선정한다. 배터리의 종류는 리튬이온 배터리로 하며, 과-충전 및 과-방전으로 인한 배터리의 수명 감소를 줄이기 위하여 배터리의 충전상태(State Of Charging, SOC)가 20%~95% 사이에서 동작할 수 있도록 하며, 배터리의 용량은 발전기의 최대출력보다 다소 높도록 적용한다. 배터리의 출력은 배터리의 용량 및 C-rate에 따라 차이가 발생하므로, 본 논문에서 배터리의 최대 충전 C-rate는 0.5C로 설정하며, 방전 C-rate는 최대 1C로 제한한다. 본 논문에 적용하는 배터리 연계형 전력 관리 시스템의 배터리 사양 및 운용 알고리즘은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

- 배터리의 사용범위에 따른 용량(kWh)은 발전기의 최대 출력(kVA)을 크게 넘지 않도록 한다.
- 배터리의 충전 C-rate와 방전 C-rate는 각각 최대 0.5C, 1C로 하며, 충전 최소 C-rate는 0.1C 이상으로 한다.
- 배터리에서 공급하는 전력은 화학적 반응의 결과이므로 원동기-발전기로 이루어진 기계식 발전 시스템보다 전력 부하 변동에 따른 전력 공급을 빠르게 할 수 있

다. 따라서 모든 발전기의 부하분담 운전/정지 부하율은 발전기의 최대효율점인 85%의 부하율로 설정한다.

- 모든 운항 모드에서 최소 1대의 발전기를 구동하여 선내 전력을 공급하도록 한다. 즉, 배터리 단독으로 선내 전력을 공급하지 않는다. 이는 배터리만으로 선내 전력을 공급하며 배터리의 잦은 충-방전을 방지하기 위함이다.
- 배터리를 적용하는 전력 시스템의 배전반 전원은 직류전력으로 가정하여 시뮬레이션을 진행할 수 있도록 한다.
- 경우에 따라 배터리의 잦은 충-방전으로 인한 수명 단축을 줄이기 위하여 충-방전은 히스테리시스 기반으로 제어를 수행할 수 있다.

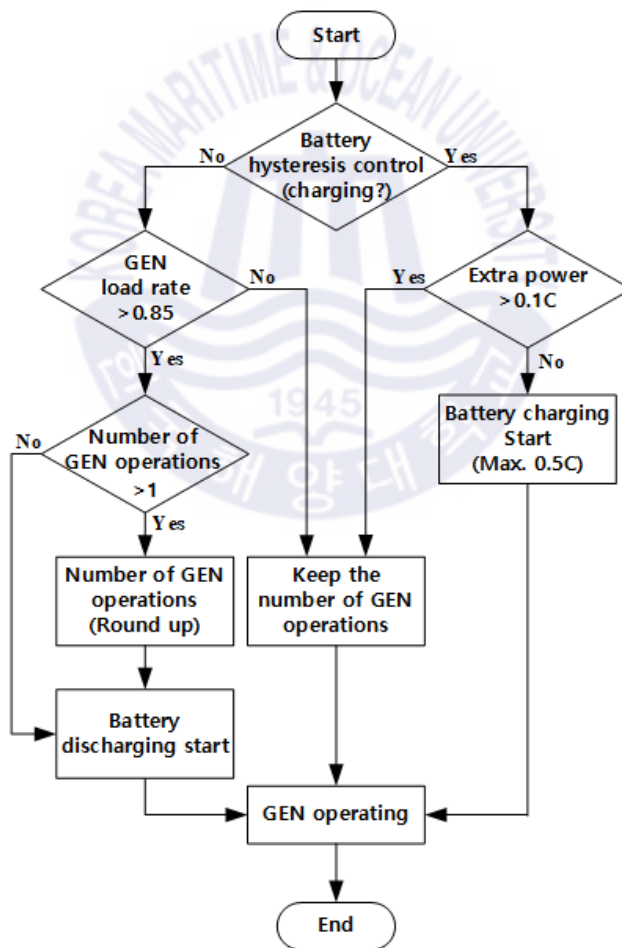


Fig. 3.8 Flowchart of battery linked PMS(with hysteresis control)

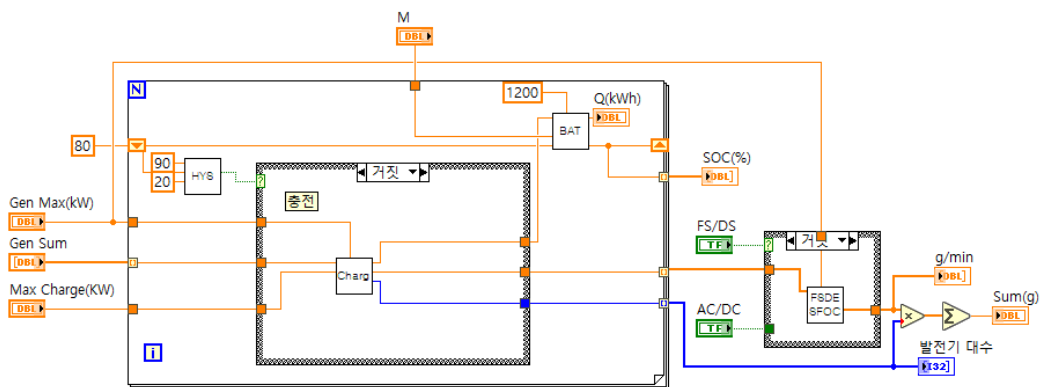


Fig. 3.9 Block diagram of battery linked PMS(with hysteresis control)

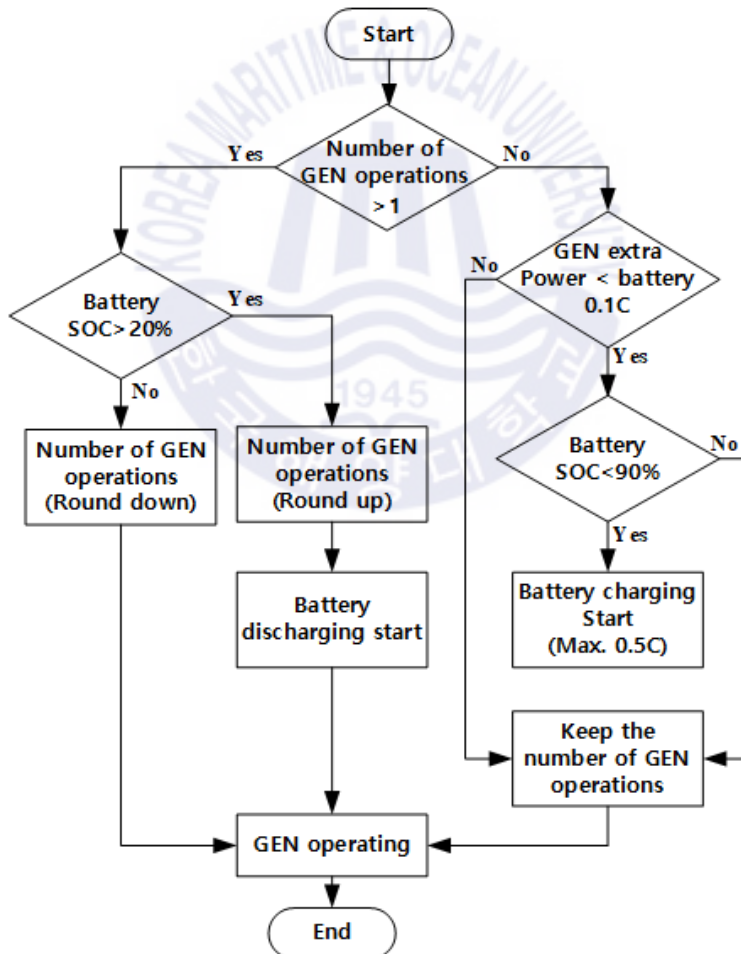


Fig. 3.10 Flowchart of battery linked PMS(without hysteresis control)

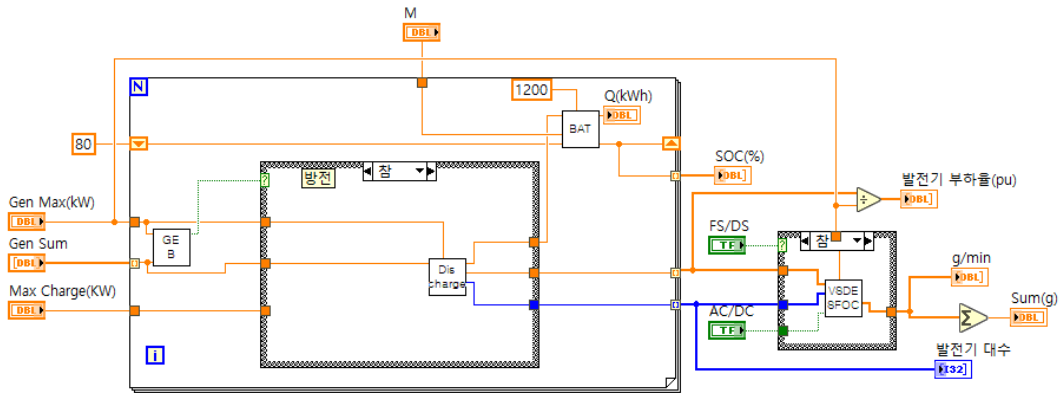


Fig. 3.11 Block diagram of battery linked PMS(without hysteresis control)

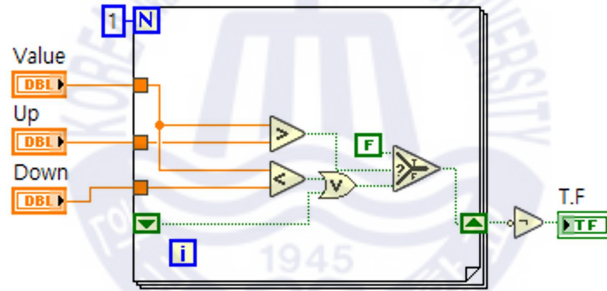


Fig. 3.12 Block diagram of hysteresis control

3.2.5 통합 기관 제어 시스템

전기식 추진 시스템에서는 발전 시스템과 추진 시스템이 전력을 공유함에 따라 보다 유연하게 전력을 운용할 수 있다. 특히, 배터리와 축 발전기를 이용하여 선내 전력을 공급할 수 있으므로 다음과 같은 이점을 갖는다.

- 선내 전력 부하와 발전기의 부하율 상황에 따라 배터리의 충전 또는 방전이 능동적으로 이루어질 수 있으므로, 발전기를 연비특성이 좋은 부하율에서 운용함으로써 에너지 효율을 향상할 수 있다.

- 선내 중-부하 사용 등의 갑작스러운 부하 증가로 인한 여유 전력 부족 문제를 응답 속도가 빠른 배터리를 활용하여 강인한 대응이 가능하다.
- 정속도 항해 중 주 추진기관의 출력을 이용하여 축 발전기를 운용하여 선내 전력 공급이 가능하므로 발전기의 운전 대수 및 시간을 줄이는 한편, 주 추진 기관의 저-부하 운전을 부분적으로 개선할 수 있다.
- 입항 및 출항 등 저속으로 운항하는 구간에서 발전기-추진 전동기 또는 배터리-추진 전동기를 활용하여 배출가스를 줄일 수 있으며, 디젤엔진과 비교하면 추진 전동기는 정-역 제어가 편리하여 선박의 조종성능을 높일 수 있다.

통합 기관 제어 시스템은 기존 기계식 추진 시스템과 구성이 달라지므로 축계에 설치되는 전동기의 사용 방법에 따라 전력 관리 시스템 및 추진 제어 시스템의 제어 알고리즘이 변화되어야 한다.

① PTO mode

주 추진기관과 발전기는 선박의 노후화로 인한 저항의 증가 및 경년변화에 따른 출력 감소 등을 고려하여 별도의 출력 여유율을 계산하여 필요 출력보다 높은 출력을 갖도록 탑재된다. 이러한 설계로 인해 주 추진기관 및 발전기가 최적 효율 구간에서 운항 일정과 환경에 따라 운용되지 못하고 있다. 그 결과 저-부하 운전으로 인한 효율저하 및 경년변화에 취약하다. 이러한 단점을 보완하고 발전기의 운전 대수를 줄이기 위하여 축 발전기를 탑재하여 개선할 수 있다. PTO mode의 시스템 사양 및 운용 알고리즘은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

- 축 발전기의 최대 출력은 탑재되는 발전기의 최대 출력과 유사하도록 한다.
- 축 발전기는 선박이 최소 10knot 이상의 축계 회전속도를 가질 때 전력을 생산할 수 있으며, 그 이하의 속도에서는 운용하지 않는다.
- 축 발전기는 선박이 항해 모드일 때만 동작하도록 하며, 정박 또는 입항 및 출항 때는 동작하지 않는다. 이때의 발전기 운용은 이상적인 전력 관리 시스템의 발전기 부하분담 운전/정지 운용 알고리즘에 따른다.
- 선박이 항해상태일 때 축 발전기만으로 모든 전력 부하에 전력 공급이 가능할 경우 추가의 발전기를 운용하지 않고 축 발전기만으로 선내 전력을 공급할 수 있다.

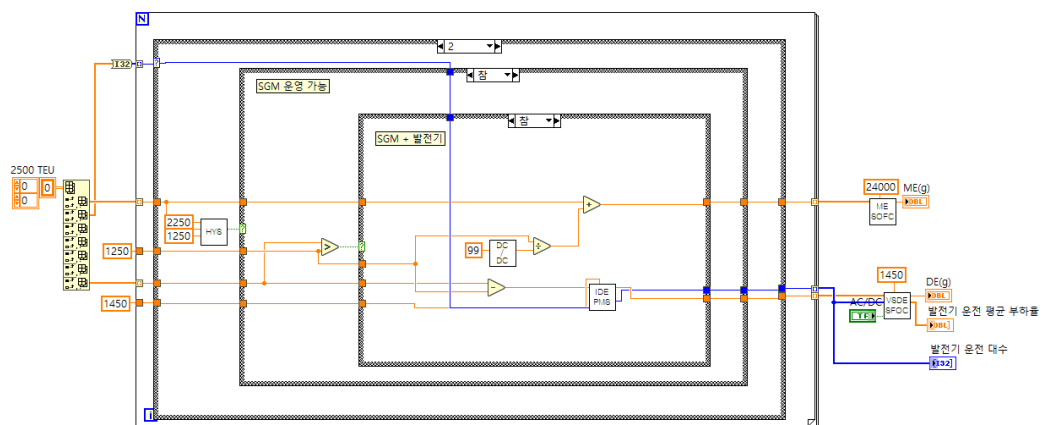


Fig. 3.13 Block diagram of PTO mode

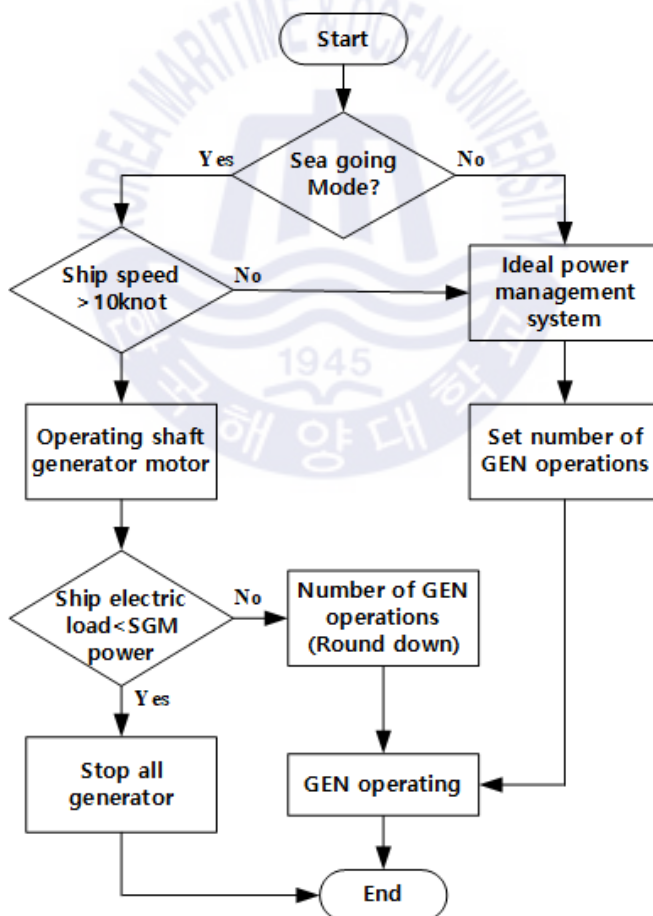


Fig. 3.14 Flowchart of PTO mode

② PTO mode(with ESS)

PTO mode에 배터리를 탑재하여 에너지를 보다 유연하게 사용 가능하므로 발전기를 높은 효율 구간에서 사용할 수 있다. PTO mode에 배터리를 탑재할 경우 시스템의 사양과 동작 알고리즘은 다음과 같다.

- 정박 시 발전기의 운용 부하율이 낮을 경우, 발전기를 이용하여 배터리 SOC의 95%까지 충전할 수 있도록 한다.
- 항해 중일 때 축 발전기만으로 선내 모든 전력부하에 전력 공급 후 출력 여유가 있으면, 배터리의 SOC가 최대 90%까지 충전할 수 있도록 한다.
- 배터리 용량과 충전 및 방전 C-rate는 배터리 연계형 전력 관리 시스템과 같은 사양을 가지도록 한다. 발전기 부하율에 따른 운용 알고리즘은 배터리 연계형 전력 관리 시스템 중 배터리 충전 및 방전에 히스테리시스 제어를 수행하지 않는 알고리즘을 따르도록 적용한다.

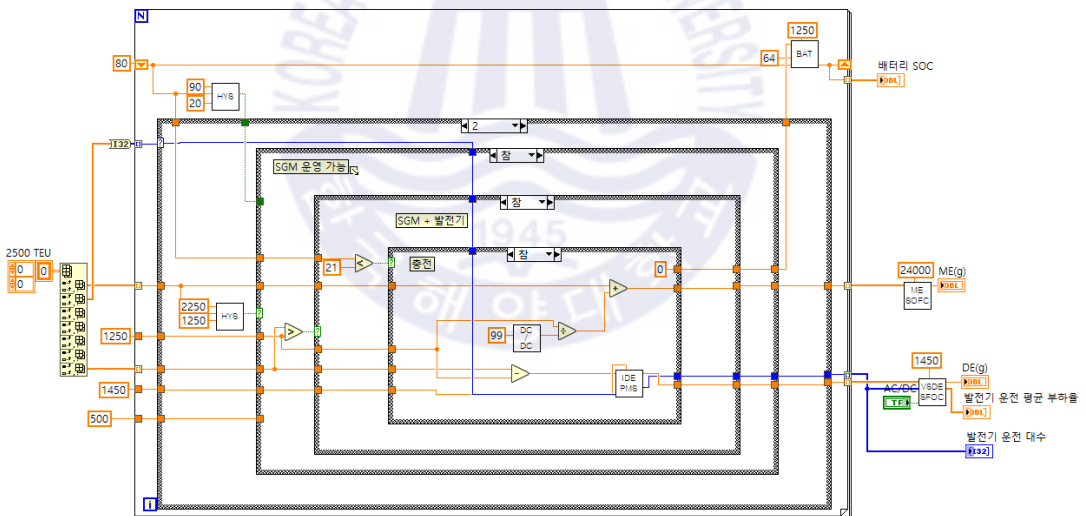


Fig. 3.15 Block diagram of battery linked PTO mode engineering control system

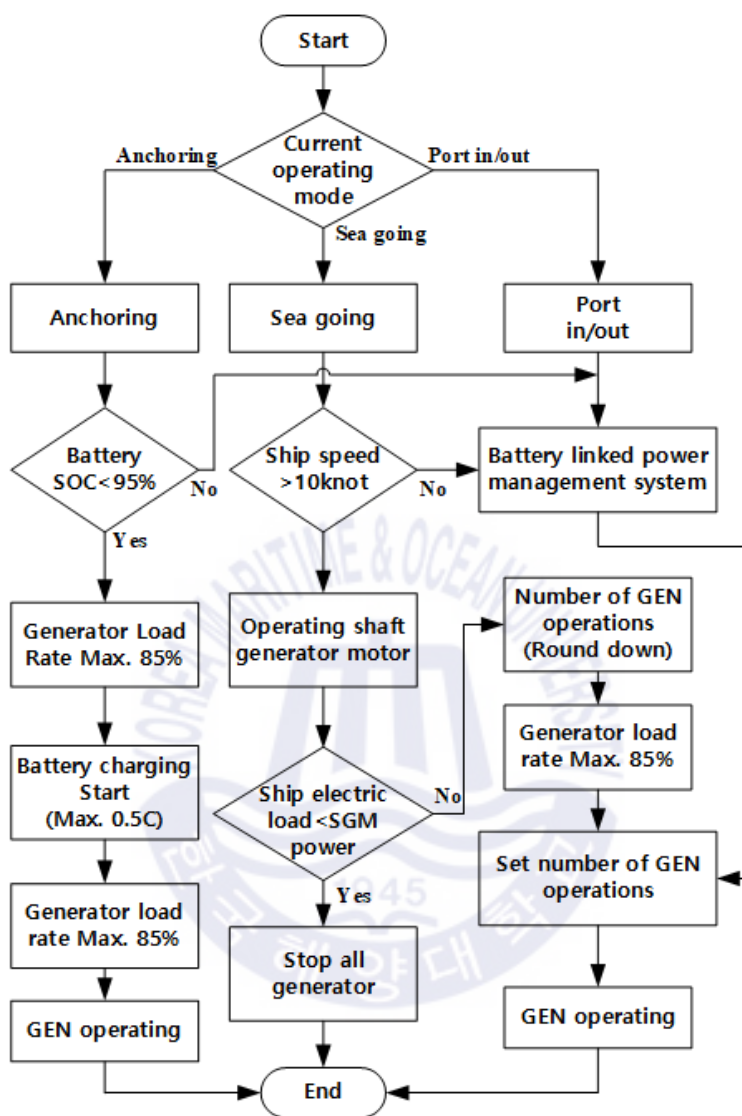


Fig. 3.16 Flowchart of battery linked PTO mode

③ PTO & PTI mode

PTI mode를 적용하게 되면 입항 및 출항할 때 주 추진기관을 대신하여 추진 전동기를 사용할 수 있으므로 배출가스 저감으로 인한 환경적인 측면에서 많은 이점을 가진다. 더불어 추진 전동기는 주 추진기관인 디젤엔진 등과는 달리 저-부하에서도 높은 운전 효율을 가지며, 회전의 정-역제어의 적용이 쉽다는 이점을 가진다. 이러한 이점은 축계가 회전 중에도 역 토크를 생성할 수 있으므로 선박의 조종성능을 높일 수 있다. 그러나 주 추진기관과 보조 추진기관을 함께 탑재하는 것은 많은 공간이 필요할 뿐만 아니라 무게 또한 많이 늘어나는 단점을 가진다.

그러나 추진 전동기를 운용할 때, 일부 항해사와 기관사의 경험에 따르면 입항 및 출항 시간은 짧으면 20분, 길면 6시간까지 소요되므로 선박을 안정적으로 항구에 접안하기 위하여 높은 토크가 필요하므로 충분한 출력을 낼 수 있는 추진기관을 탑재를 고려해야 한다. PTO & PTI mode의 시스템 사양 및 동작 알고리즘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- 추진 전동기의 출력은 PTO mode의 축 발전기와 같은 사양을 가진다.
- PTI mode는 입항 및 출항할 때만 사용할 수 있도록 하며, PTI mode에서 추진 전동기와 주 추진기관의 절환, 또는 그 반대의 경우의 과도 상태는 고려하지 않는다.
- 전력 시스템에 배터리를 탑재하는 경우, 배터리의 용량은 앞서 적용한 배터리 연계형 전력 관리 시스템과 배터리 연계형 PTO mode의 용량과 같도록 하며, 전력체계는 직류전력을 적용하는 것으로 한다.

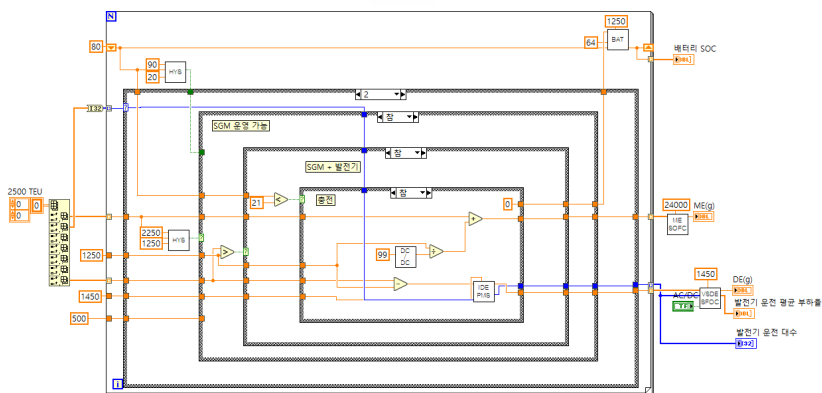


Fig. 3.17 Block diagram of battery linked PTO&PTI mode engineering control system

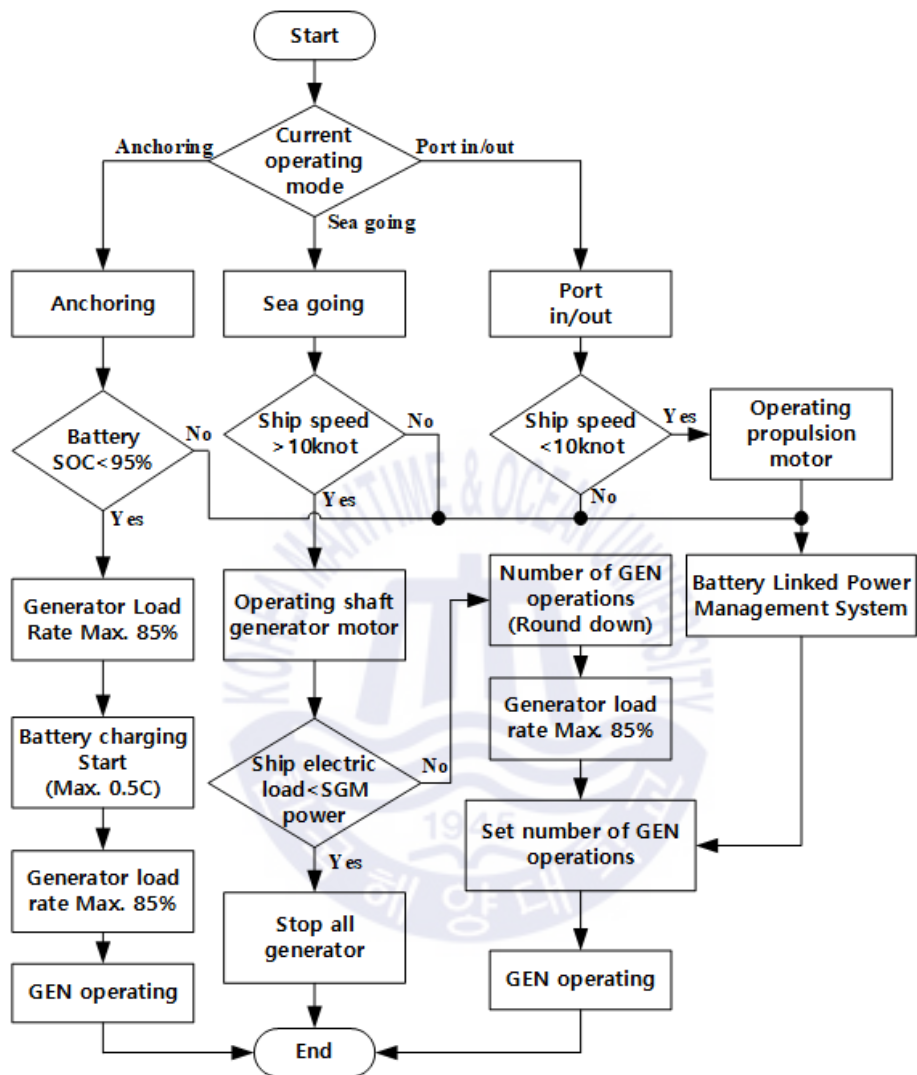


Fig. 3.18 Flowchart of battery linked PTO&PTI

제 4 장 가상선박 설계 및 모델링

4.1 가상선박 설계 및 모델링 방향

해외 선진업체인 노르세 베리스타는 선박 통합 시스템에서 선박 장비 적용에 따라 최적화된 설계, 운용 및 제어할 수 있는 컴퓨터 플랫폼인 ‘COSSMOS’를 개발하였다. ‘COSSMOS’는 선박의 기계 시스템 구성 및 적용에 따른 에너지 효율, 배출가스 및 안전에 관한 결과를 비교 및 제시하여 선박 성능을 개선한다.

본 논문에서는 2장과 3장에 나타난 선박의 추진 및 전력 시스템의 구성 방법에 따라 운용방법 및 제어 알고리즘 적용에 따른 에너지 효율을 비교 및 분석하고자 한다. 전기식 추진 시스템의 경우 추진 및 전력 시스템의 상호 연동성을 고려하여 통합 제어 시스템 운용방법이 다르게 적용된다. 따라서 같은 운항조건에서도 선박의 에너지 효율에 따라 연료유 소비량이 달라진다. 본 논문에서는 선박의 추진 및 전력 시스템의 구성 및 운용방법에 따른 에너지 효율 비교를 위한 가상선박의 선박 선속-출력 모델, 메인 엔진 연비특성 모델, 발전기 연료특성 모델, 추진 전동기 효율 모델, 축 발전기 모델과 배터리 효율 모델을 개발한다.

일반적으로 선박 설계 및 검증에 활용되는 시뮬레이션은 시간에 따른 동특성 시뮬레이션(dynamic simulation), 또는 HILS(Hardware In the Loop Simulation)를 이용한 제어기 검증을 수행한다. 이러한 이유로 선박 추진 및 전력 시스템의 시뮬레이션은 여러 역학 및 전력조류 해석 등의 다양한 방법을 통하여 시뮬레이션을 수행한다. 그러나 이러한 동적 시뮬레이션 모델은 선박의 정상상태보단 과도현상(transient phenomenon)의 해석을 목표로 하여 시뮬레이션 수행에 많은 시간 및 컴퓨터 자원을 필요로 한다. 이러한 물리적 한계를 해결하기 위하여 실시간 시뮬레이션 및 에너지 효율 분석을 위한 시스템 모델을 단순화하여 설계하고, 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한다[63-65].

본 논문은 선박 전력과 추진 시스템의 구성 변경 및 운용 알고리즘에 따른 에너지 효율을 비교하기 위한 시뮬레이션을 진행하며, 선박 전력과 추진 시스템의 구성 변경에 따른 시뮬레이션 활용성을 높이기 위하여 선박 선속-출력 모델, 메인 엔진 연비특성 모델, 발전기 연료특성 모델, 추진 전동기 효율 모델, 축 발전기 모델과 배터리 효율 모델을 subVI(virtual instrument)로 구현한다. 이를 통하여 선박의 사양 및 탑재되는

장비가 변하더라도 변경된 사양에 맞추어 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 한다. 시뮬레이션 모델은 선박의 실측 데이터를 활용하여 데이터 보간(interpolation)과 회귀(regression)기법을 이용하여 모델을 개발한다. 즉, 선박의 동특성 모델링을 통한 과도상태 해석이 아닌 시스템 경향을 분석하는 것으로 시스템의 역학(dynamics) 및 시간 영역에서의 분석을 진행하지 않는다. Fig. 4.1은 시뮬레이션 개념도를 나타낸다.

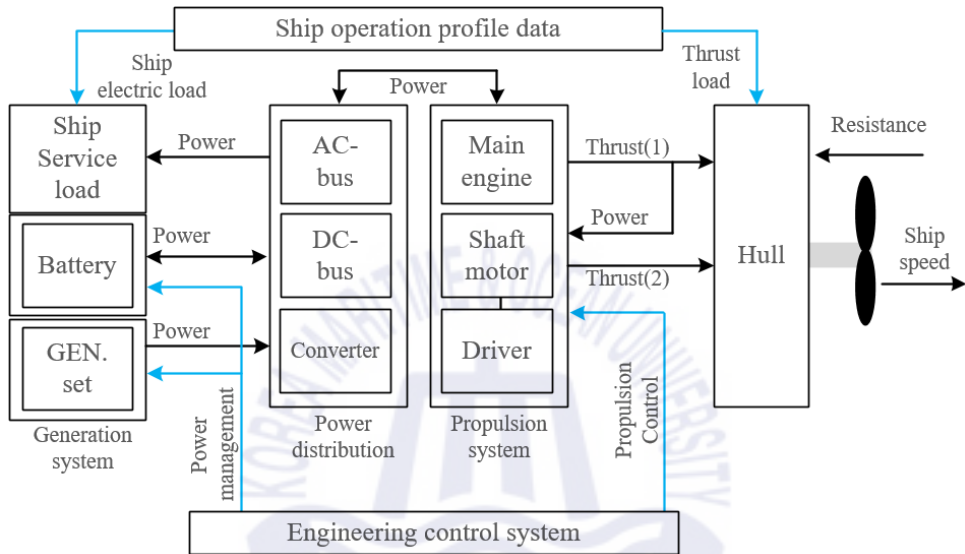


Fig. 4.1 Diagram of simulation conceptual

시뮬레이션 모델은 본 논문에서의 대상 선박인 컨테이너 선박에 현재 적용돼 있는 기계식 추진 시스템의 연료 소비량을 기준으로 선박 추진 및 전력 시스템의 구성 변경 및 알고리즘 적용에 따른 연료 소비량을 비교 분석한다. 대상 선박은 ‘H’ 선사에서 운항한 선박에서 실제로 취득한 데이터를 활용하며, 데이터의 활용 또는 적용이 적절하지 않으면 주요 장비사의 사양 데이터 및 기타 참고문헌 데이터를 활용하여 데이터 회귀를 통한 모델을 개발한다.

본 논문에서 개발하는 선박과 주요 장비의 시뮬레이션 모델은 선박에 따른 선속-출력 모델, 메인 엔진 연비특성 모델, 발전기 연료특성 모델, 추진 전동기 효율 모델, 축발전기 모델과 배터리 효율 모델이다. 각각의 모델은 subVI로 구현하여 여러 시뮬레이션 환경에서 사용 가능하도록 한다. Fig. 4.2는 각각의 시뮬레이션 모델에 대한 계층구조를 나타낸다.

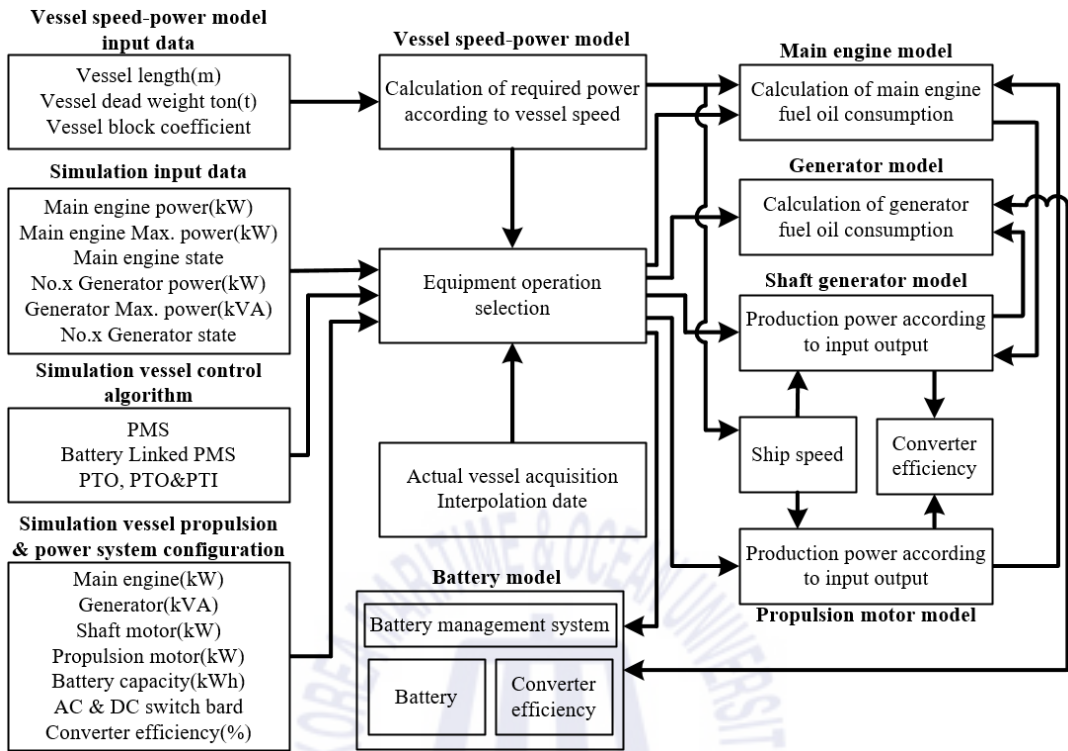


Fig. 4.2 Simulation model hierarchy

선속에 따른 출력 모델은 PTO mode 및 PTI mode의 제어 알고리즘에 따라 축 발전 기로의 사용 또는 추진 전동기로서의 사용 시점을 선속 기반으로 적용할 수 있도록 한다. 본 논문에서 PTO mode의 적용은 선박이 10knot 이상의 선속으로 운항할 때 사용할 수 있도록 하며, PTI mode의 적용은 선박이 입항 및 출항 중일 때 선속 10knot 이하에서 운용할 수 있도록 한다. 이러한 제어 설정 구간 값은 프로그램에서 사용자가 변경할 수 있도록 구현한다.

전력 시스템의 경우 전동기의 발전기모드 또는 추진기 모드 사용에 따른 전력 변환 효율, 배터리 충-방전 장비의 효율, 배터리 자체 효율 등을 고려하여 연료 소비량을 나타낸다. 즉, 실제 선박 운항데이터에서 1,000kW의 전력을 소비할 경우 발전기를 이용하여 전력을 공급하는 것과 배터리를 이용하여 전력을 공급할 때 실제로 소비되는 에너지량이 다르게 적용된다.

4.2 데이터 보간 및 다항식 회귀

4.2.1 데이터 보간

본 논문에서는 앞서 기술한 것과 같이 동적 모델링을 통한 과도상태 해석이 아닌 선박의 구성 변경 및 운용 알고리즘에 따른 에너지 효율을 비교 및 분석하는 것으로, 선박의 실측 데이터, 장비 제조사의 데이터 및 기타 참조자료를 활용하여 적합한 데이터 보간 또는 회귀 등을 통하여 모델로 활용한다.

선박의 데이터는 선박에 따라 5분 또는 10분 간격으로 측정한 데이터를 활용한다. 데이터의 취득간격(sampling timing)이 다르므로 에너지 효율성 비교를 위한 시뮬레이션 활용성을 높이기 위하여 데이터 보간 기법을 적용하여 1분 간격의 일정한 규칙을 갖도록 데이터를 보정하여 사용한다. 또한, 실측 데이터는 선박에 따라 취득한 데이터의 항목이 다르므로 공통된 항목을 활용하여 시뮬레이션을 진행한다.

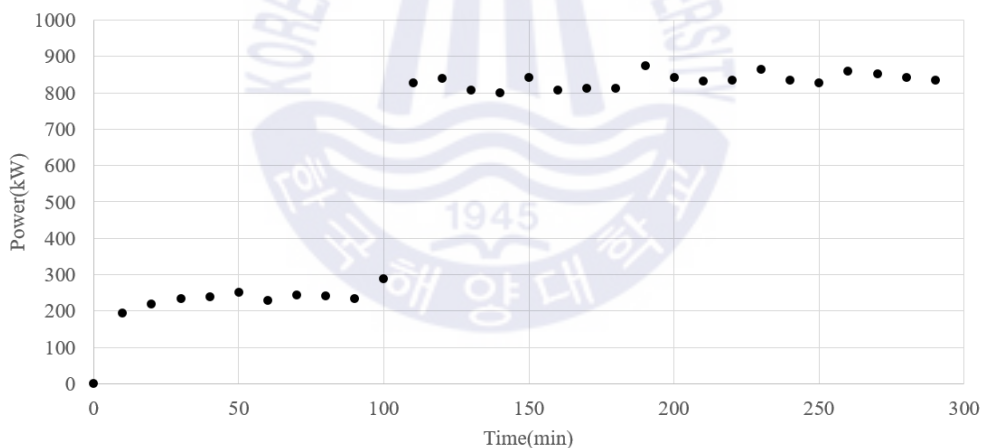


Fig. 4.3 No.3 generator power of 6,800 TEU container vessel

Fig. 4.3을 보면 ‘0분’ 일 때 3번 발전기가 정지된 상태에서 ‘10분’에 발전기가 운전되고 있음을 알 수 있으며, 이를 통하여 ‘0분’과 ‘10분’ 사이에 발전기가 기동되었음을 추측할 수 있다. 또한, ‘100분’과 ‘110분’ 사이에 급격하게 생산 전력량이 커짐을 확인할 수 있다.

그러나 5분 또는 10분간의 전력 데이터를 활용하여 배터리 충전 및 방전에 따른 배터리 충전상태(SOC)를 계산할 경우 데이터 수집 간격 시간 동안 일정한 양의 충전 또는 방전으로 계산되어 경우에 따라 배터리의 충전상태가 20%이하로 떨어지거나 경우에 따라 음(-)의 값을 가질 수도 있다. 이러한 현상을 막기 위하여 시뮬레이션에 적용하는 모든 모델 및 데이터는 1분 시간 단위로 계산 또는 보간하여 적용한다. 이러한 통일된 루프타임(loop time)은 하나의 시뮬레이션 모듈을 활용하여 발전기 및 주 추진기관과 같이 연료유를 소비하는 장비에 대한 연료 소비량 적산을 가능하게 한다. 그러나 너무 짧은 시간 간격에 따른 데이터 보간은 에너지 효율 비교를 위한 연료 소비량 적산에 많은 연산 및 메모리 자원을 필요로 하므로 본 논문의 시뮬레이션은 1분 간격의 데이터를 적용한다.

데이터 보간은 기법에 따라 여러 방법이 존재한다. 회귀를 통하여 데이터값들을 지나는 추정 함수(estimated function)를 계산하거나, 주어진 데이터 값들을 연결하는 선형 보간한 값의 사용 또는 2차식 및 다항식의 곡선으로 값을 연결하여 사용하는 등 여러 방법을 통하여 값을 추정할 수 있다. 본 절에서는 시뮬레이션 수행을 위하여 선박 운항 시나리오(scenario)에 따른 실제 취득한 입력 데이터 항목(발전기별 전력 생산량, 주 추진기관의 출력)에 대하여 1분 간격으로 데이터를 보간 및 회귀한다. 보간된 데이터의 검증은 실제 값과 예측 값의 차이를 나타내는 평균 제곱근 편차(Root Mean Square Error, RMSE), 평균 제곱근 편차의 의존적 오류의 단점을 보완할 수 있는 평균 절대적 백분율 오차(Mean Absolute Percentage Error, MAPE), 예측 값과 실제 값의 차이를 평균 변동 폭으로 나타내는 평균 절대적 스케일 오차(Mean Absolute Scaled Error, MASE) 등이 사용된다. 본 논문에서 예측 데이터의 검증은 평균 제곱근 오차를 사용하며, 검증 함수는 식 (4.1)과 같다. 여기서 \hat{y}_i 는 예측 값, y_i 는 실제 값, n 은 데이터 개수를 의미한다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4.1)$$

① 선형 보간(Linear interpolation)

선형 보간법은 시작 값과 끝 값이 주어졌을 때 사이에 위치한 값을 추정하기 위하여 직선거리에 따라 선형적으로 계산하는 방법으로 식 (4.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y = y_0 + (y_1 - y_0) \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad (4.2)$$

즉, 선형 보간법은 1차원 직선상에서 양 끝 값을 이음으로 하나의 기울기를 갖도록 하여 직선상에서 이루어지는 보간법이다. Fig. 4.3의 6,800 TEU 선박에서 3번 발전기의 전력 생산량 10분마다의 데이터를 선형 보간을 통하여 1분 간격으로 전력 생산량을 나타내면 Fig. 4.4와 같다. 선형 보간법을 통한 예측 값은 입력된 x 에서의 y 값이 항상 일치하므로 평균 제공근 편차는 항상 '0' 이 된다.

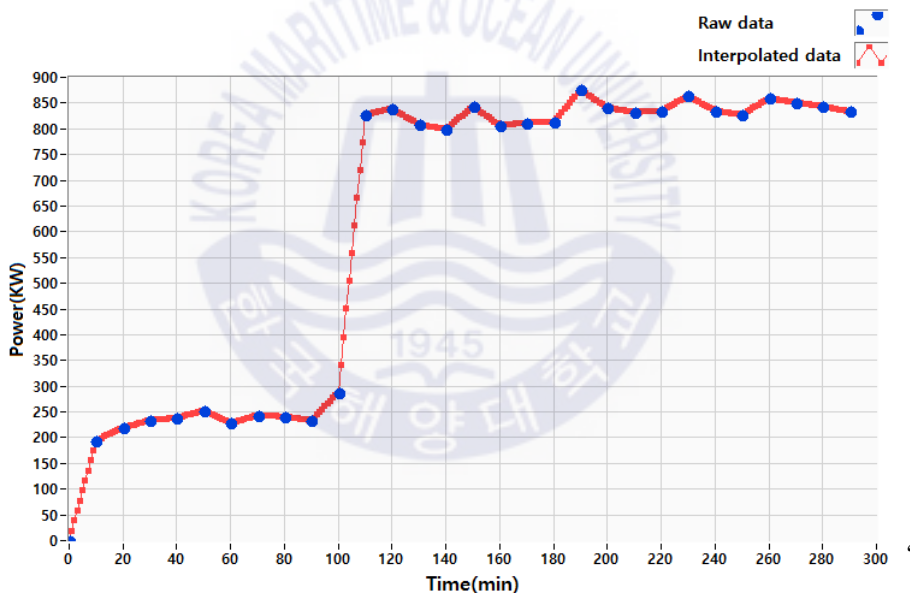


Fig. 4.4 Result of linear interpolation

선형 보간법은 보간된 예측 값의 기울기가 급격하게 변하게 된다. 이러한 변화를 부드럽게 하기 위하여 다항식을 적용한 다항식 보간법을 확장하여 사용할 수 있다.

② 다항식 보간(Polynomial interpolation)

다항식 보간법은 다항식의 차수에 따라 2차, 3차 등으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 입력한 n 개의 포인트(x_i, y_i)의 세트로 주어진 값에서 함수 $f(x)$ 를 보간하거나 외삽하도록 한다. 이러한 다항식 보간법은 다항식의 차수 및 계수의 정밀도에 따라 예측된 값이 큰 차이를 가진다. Fig. 4.5는 5차 다항식의 계수를 소수점 6자리까지 처리하였을 때 Fig. 4.3의 입력 값에 대한 예측 값을 나타내며, Fig. 4.6은 6차 다항식의 계수를 소수점 6까지 처리하였을 때의 예측 값을 나타낸다.

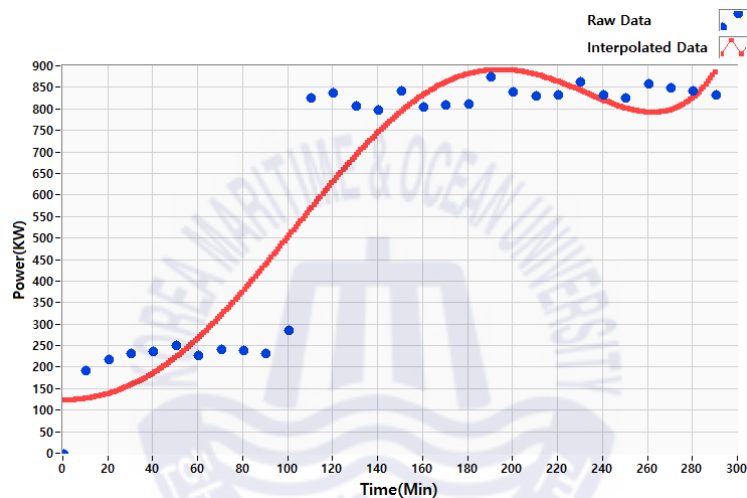


Fig. 4.5 Result of 5th order polynomial interpolation

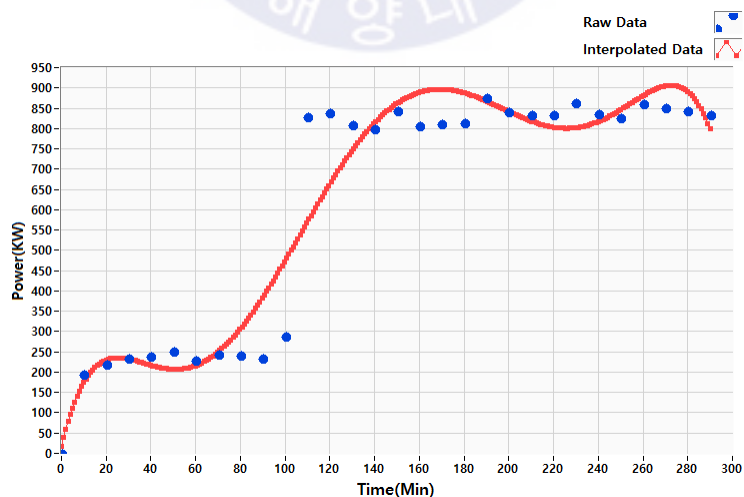


Fig. 4.6 Result of 6th order polynomial interpolation

② 스플라인 보간(Spline interpolation)

스플라인 보간법은 입력 데이터가 순차적일 때 각 데이터 사이 값을 다항식으로 연결하여 보간하는 것이다. 이때 연결되는 포인트에서 미분계수 또는 고계 미분계수가 일치하도록 하여야 한다.

즉 주어진 데이터는 $(x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_n)$, $(y_0, y_1, y_2, \dots, y_n)$ 과 같은 순서에 따라 입력될 때 포인트 (x_{n-1}, y_{n-1}) 와 포인트 (x_n, y_n) 사이의 값을 직선이 아닌 다항식을 갖는 곡선으로 적용한다.

각 포인트의 보간 차수에 따라 1차, 2차, 3차 등 보간법이 다소 차이가 발생한다. 본 논문에서는 2차 스플라인 도함수를 적용한다. 스플라인 보간의 2차 도함수는 $f(x_i) = y_i$ 일 때 보간 함수 $g(x)$ 는 식 (4.3)과 같이 구간별 함수를 가진다.

$$g(x) = \begin{cases} P_0(x) & x_0 \leq x \leq x_1 \\ \dots & \dots \\ P_{n-2}(x) & x_{n-2} \leq x \leq x_{n-1} \end{cases} \quad (4.3)$$

함수 $p(x)$ 는 3차 다항식이며 아래와 같은 조건을 충족하도록 한다.

- $g(x_i) = y_i = P(x_i)$, $g(x_i) = y_i = P_{i-n}(x_i)$
- 각 내부 x_i 에서 $i = 1, \dots, n-2$ 일 때 1차와 2차 도함수는 연속적이어야 한다.
 - a. $g'(x_i) = P'_i(x_i) = P'_{i-1}(x_i)$
 - b. $g''(x_i) = P''_i(x_i) = P''_{i-1}(x_i)$
- 도함수 : $\frac{x_i - x_{i-1}}{6} g''(x_{i-1}) + \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{3} g'(x_i) + \frac{x_{i+1} - x_i}{6} g''(x_{i+1})$

$$= \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} - \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}$$
- 이때 i 는 입력 데이터 개수에서 마지막 두 값을 제외한다.

2차 도함수가 결정되면 구간 $[x_i, x_{i+1}]$ 에서, 식 (4.4)와 같은 보간 값을 정의할 수 있다.

$$y = Ay_i + B_{y+1} + Cy''_i + Dy''_{i+1} \quad (4.4)$$

여기서 계수 A , B , C , D 는 식 (4.5)와 같다.

$$\begin{aligned} A &= \frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i} \\ B &= 1 - A \\ C &= \frac{1}{6}(A^3 - A)(x_{i+1} - x_i)^2 \\ D &= \frac{1}{6}(B^3 - B)(x_{i+1} - x_i)^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Fig. 4.7은 Fig. 4.2의 값에 대한 2차 도함수 스플라인 보간 값을 나타낸다.

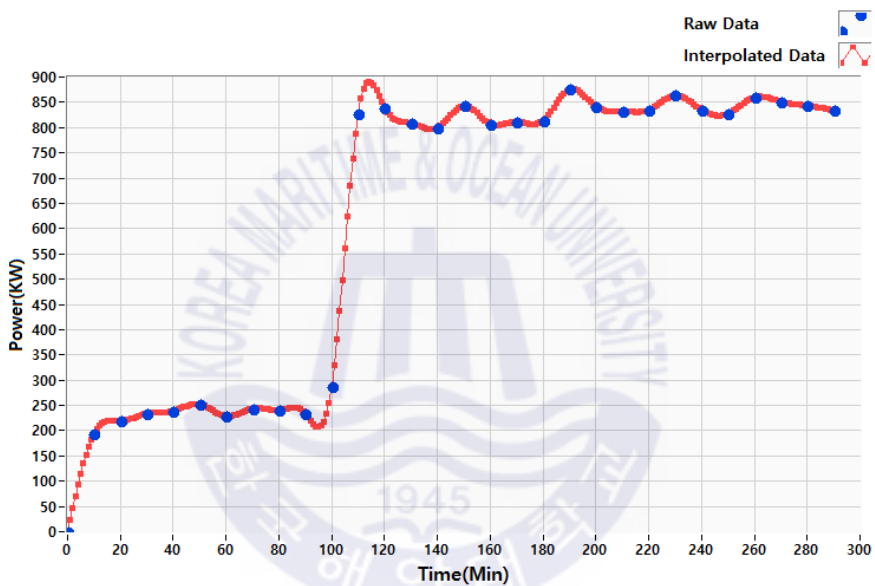


Fig. 4.7 Result of spline interpolation

보간 프로그램은 선형 보간, 다항식 보간, 스플라인 보간을 직관적으로 사용자가 값을 확인할 수 있도록 그래픽 기반으로 프로그램을 작성하였으며 각 주요 데이터에 따른 보간 기법을 적용하였을 때 실시간으로 보간된 값을 확인할 수 있도록 하였다. 또한 보간을 원하는 2D 배열 데이터를 .CSV 파일로 읽어오고 저장할 수 있도록 하였다. 취득 데이터 중 데이터 보간 항목은 아래와 같다. Fig. 4.8은 개발 프로그램의 GUI화면을 나타내며, Fig. 4.9는 프로그램 블록 다이어그램을 나타낸다.

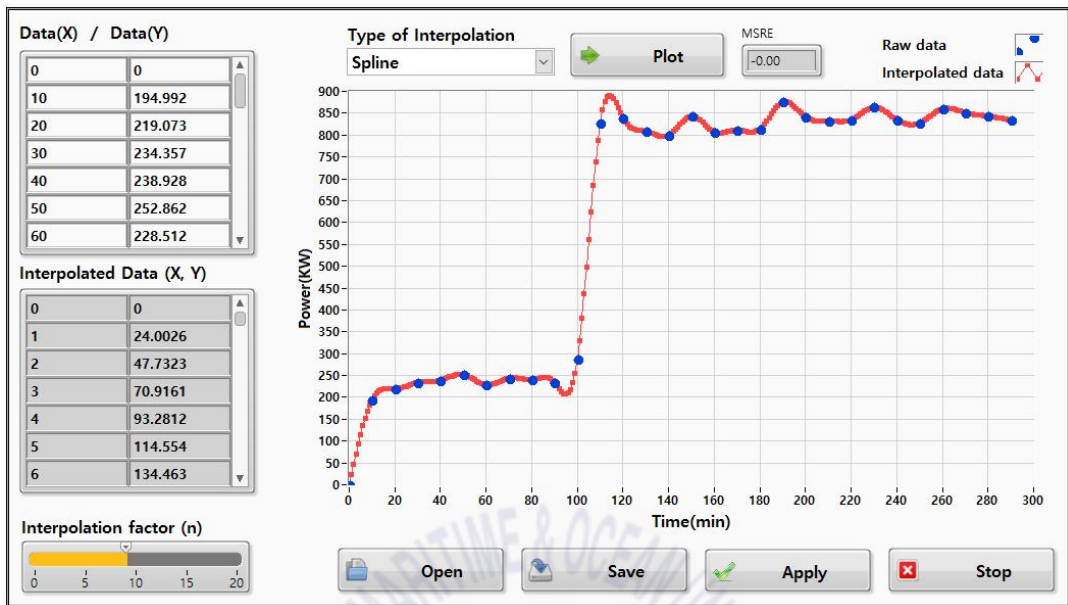


Fig. 4.8 Front panel of data interpolation program

본 논문에 시뮬레이션 입력 데이터로 활용될 메인 엔진의 출력(kW), 선속(knot), 발전기 출력(kW), 발전기 부하율(%)의 보간 값은 스플라인 보간 값을 활용하여 적용한다.

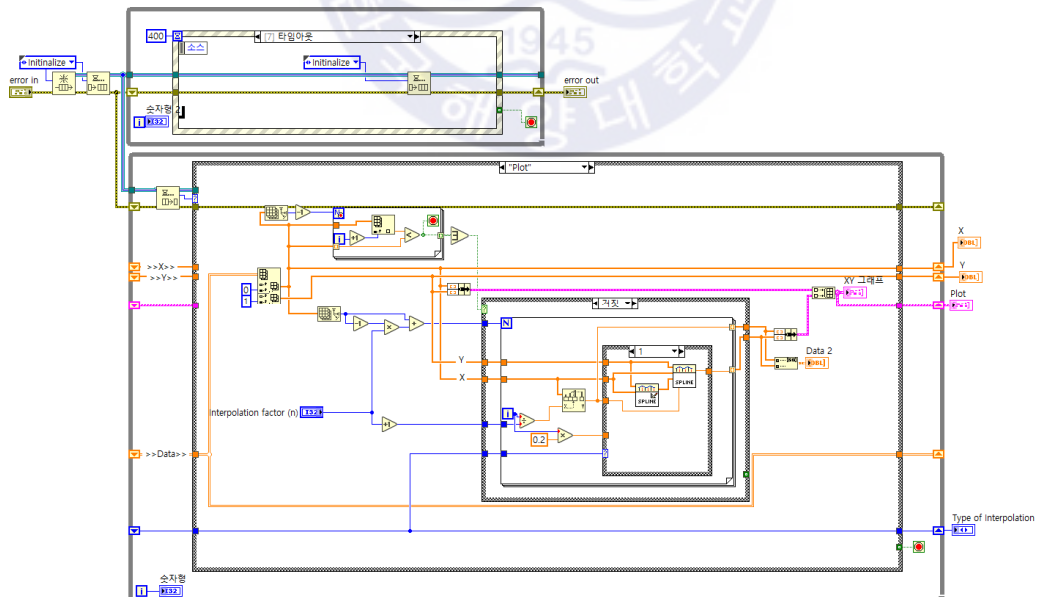


Fig. 4.9 Block diagram of data interpolation program

4.2.2 다항식 회귀

주요 장비의 특성 모델을 개발하기 위하여 실제 선박에 탑재되어 있는 장비의 운용 데이터를 활용하는 것이 좋다. 하지만 실제 운항 데이터는 선박이 운항 중 받는 외·내부 환경요인에 대하여 보정이 되어있지 않으므로 별도의 데이터 전처리과정을 통하여 보정하여 사용해야 할 뿐만 아니라 계측 오차 등을 함께 고려하여야 한다. 선박에서 측정하지 않는 데이터 항목이나, 취득한 데이터에 대하여 외부 환경을 고려한 보정이 어려울 경우 제조사 및 여러 참고문헌에서 제공하는 장비 사양을 바탕으로 데이터를 회귀 하여 사용하는 것이 좋다. 또한 확보한 데이터의 항목이 모델 개발에 필요한 입력 값에 따른 출력 값을 제공하지 않을 때 회귀 기법을 적용하여 원하는 입력 구간에서의 출력 예측 값을 얻을 수 있다.

독립변수가 2개 이상인 대상에 대하여 회귀를 진행하기 위해선 다중회귀분석을 필요로 한다. 하지만 본 논문에서는 하나의 입력 변수에 따른 출력 예측 값에 대하여 회귀를 진행함에 따라 일반 다항식 피팅(polynomial fitting)기법을 적용한다. 다항식 피팅은 방정식으로 표현된 형식의 함수에 대하여 입력된 값들을 피팅 한다. 식 (4.6)은 일반 다항식 피팅 알고리즘에 따른 다항식 커브를 나타낸다.

$$y[i] = \sum_{j=0}^m a_j (x[i])^j \quad (4.6)$$

식 (4.6)에서 a 는 다항식의 계수, m 은 다항식의 차수를 나타내며, x 와 y 는 입력 값을 뜻한다. 다항식 피팅은 피팅 방법에 따라 최소 제곱(least square) 피팅, 최소 절대 오차(least absolute residual) 피팅, 바이스퀘어(bisquare) 피팅으로 나눌 수 있다. 최소 제곱법을 사용할 경우 식 (4.7)에 따라 입력 값과 피팅 값의 오차를 최소화 하는 다항식 모델의 다항식 계수를 찾는다. 이 때 N 은 입력 값의 길이, w_i 는 가중치의 i 번째 원소, f_i 는 최적 다항식 피팅의 i 번째 원소, y_i 는 입력 값의 i 번째 원소를 뜻한다.

$$J_{SE} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} w_i (f_i - y_i)^2 \quad (4.7)$$

최소 절대 오차와 바이스퀘어 피팅법은 강건한 피팅 방법 중 하나로 최소 제곱법이 오차 최소화를 위하여 계수를 찾아가는 것과 달리 입력된 값 중 특이점이 있을 경우 특이점을 반영한 결과를 도출한다. 바이스퀘어 피팅이 대부분의 경우에 있어 최소 절

대 오차 피팅보다 특이점에 대한 영향을 덜 받는다. 최소 절대 오차법은 식 (4.8)에 따라 오차를 최소화하는 다항식 피팅 모델의 계수를 찾는다.

$$J_{AE} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} w_i |f_i - y_i| \quad (4.8)$$

바이스퀘어 피팅의 다항식 계수는 Fig. 4.10의 (a)와 같은 알고리즘을 이용하여 얻고 최소 제곱법과 같은 식 (4.6)을 이용하여 오차를 계산한다. 다항식의 n 차수에 따라 다항식의 계수(a_n)의 개수가 정해지며 피팅 오차(J_{SE})가 허용오차 범위에 들어올 때 까지 k 번 반복한다. k 번째에서 n 차항의 계수는 a_n^k 로 나타낸다.

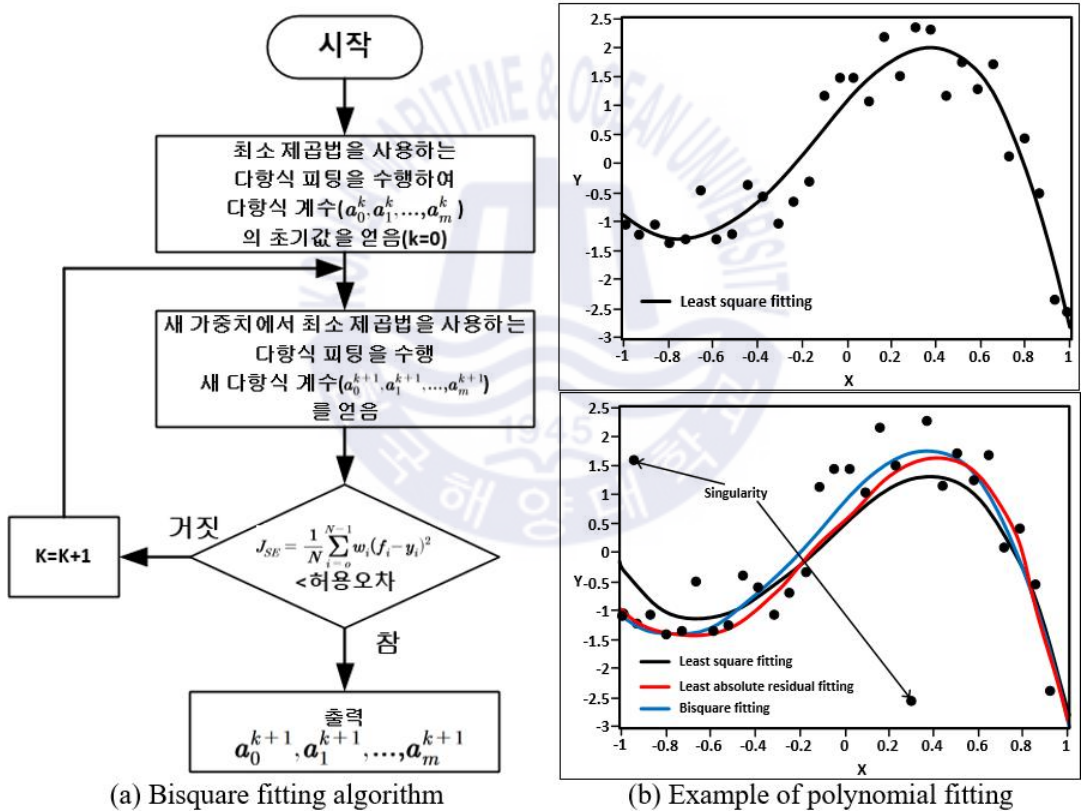


Fig. 4.10 Bisquare fitting algorithm & example of polynomial fitting

4.3 선박 선속-출력 모델

선박의 출력에 따른 선속을 예측하는 방법은 여러 방법이 존재한다. CFD, ANSYS 등의 시뮬레이션 소프트웨어를 이용한 유동 및 구조 해석 등을 통한 물리계의 해석, 축소 모형을 이용한 상사법칙 기반의 수학적 모델, 선박의 물리적 값을 이용한 수학적 예측 모델 및 상호 예측 방법을 조합하여 선박의 선속에 따른 필요 출력을 예측하는 방법 등 다양한 방법이 적용되고 있다. 선박이 건조된 이후 선속과 출력의 관계는 실측 데이터 계측을 통하여 측정하고 있다. 그러나 이러한 방법은 해상상태 및 선박의 운항 상태에 따라 같은 출력에서도 상이한 선속을 나타내므로 환경에 따른 데이터 보정 작업이 필수적이다. 본 논문에서는 시뮬레이션 대상 선박의 주요 제원을 이용한 W.Froude 방법에 의한 모델을 적용한다. W.Froude 모델 적용을 위한 시뮬레이션 대상 선박의 주요 제원은 Table 4.1과 같다.

Table 4.1 Specification of the simulation target vessels

	6,800 TEU	2,500 TEU
Length overall	299 m	210 m
Extreme breadth	40 m	32 m
Deadweight(DWT)	80,000 ton	32,600 ton
Main engine power	68,250 kW	24,000 kW
Generator power	3,000 kVA•4ea	1,450 kVA•4ea
Max. speed	25 knot	20 knot
Data scquisition cycle	10 min	5 min

선박이 목표 속력으로 운항하기 위하여 선박이 해상에서 받는 저항을 이겨내야만 한다. 선박이 받는 저항성분을 크게 나누면, 선박의 수면 아래 부분이 받는 물의 저항과 수면 위부분이 받는 공기의 저항으로 분류할 수 있다. 선박의 형태 및 속도에 따라 영향을 받는 저항의 크기는 달라지나, 공기 저항은 물의 저항에 비하여 매우 작은 값을 가져 통상적으로 무시하는 경우가 많다. 선박이 받는 저항은 W.Froude 방법과 G.Hughes 방법으로 분류되어지나, 본 논문에서는 W.Froude 방법을 바탕으로 선체 저항을 분류한다. Table 4.2는 저항의 종류와 그 특성을 간략히 나타낸다[76,77].

Table 4.2 Classification and characteristics of hull resistance

종류	특징
Frictional resistance	Resistance from contact between water and hull surfaces. Proportional to the flooded area of the hull and relative to surface conditions and speed of the hull. Increased or decreased in proportion to 1.825 squared according to ship speeds.
Wave-making resistance	The ship must generate waves to navigate, so energy to keep the waves must be supplied to the hull. The required energy is proportional to two squares of the ship's speed, depending on the ship's speed.
Eddy-making resistance	Vortex occurs due to fluid dropping from hull due to immersion in water, proportional to 4 squared of speed but 5 to 10% of frictional resistance.
Air resistance	Resistance due to air by the hull part exposed on the surface of the water. Proportional to the square of the ship speed, but only 2 to 3% of the resistance to water by wind.

통상적으로 조파저항(wave-making resistance)과 조와저항(eddy-making resistance)을 합쳐 잉여저항(residual resistance)이라고 부르며, 마찰저항(frictional resistance) 및 잉여저항에 비하여 공기저항(air resistance)은 극히 작으므로 무시하는 경우가 많다. Table 4.2에 나타나듯 선박의 주요저항은 선속과 많은 연관성을 가진다. 따라서 선박이 필요로 하는 속력으로 항해하기 위한 필요 동력의 계산은 선체저항 성분을 고려해야 한다.

선속을 계산하기 위하여 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 활용하여 최대 속력에 필요한 동력을 산출하거나, Froude 및 Reynold 상사법칙을 이용하여 예상 동력을 구할 수 있다. Froude 및 Reynold 상사법칙에 따른 출력과 선박의 톤수 및 속력의 관계는 식 (4.9)와 같이 나타낼 수 있다[76].

$$P_{IHP} = k \times D^{\frac{2}{3}} \times V^3 / C \quad (4.9)$$

(P_{IHP} :지시마력[HP], k :비례상수, D :톤수[ton], V :속력[knot], C :에드미랄티 계수)

추진기관의 소요마력을 산정하는 방법에는 유효마력과 추진효율을 이용한 방법, 애드미랄티 계수법(admiralty coefficient method)을 적용하는 방법, 모형 수조시험을 통한 추정 방법, 비교법칙을 응용하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 별도의 모형실험 등을 진행하지 않고 선속과 필요 동력을 계산할 수 있는 애드미랄티 계수법을 적용한다.

애드미랄티 계수법에 따르면 선박이 받는 저항(R_t)은 마찰저항(R_f)이 대부분을 차지한다. Froude 마찰저항 식에서 마찰저항은 선속의 1.825 승에 비례하나 반올림하여 2승에 비례하는 것으로 표기한다. 따라서 애드미랄티 계수법을 따르면 선속과 동력과의 관계는 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$R_f = f A V^2 \quad \therefore R_t \propto A V^2 \quad (4.10)$$

식 (4.10)의 A 는 선박의 침수면적(m^2)이며, f 는 선박의 길이와 선속에 관한 계수로 개략적인 값은 Table 4.3과 같다[76].

Table 4.3 Coefficient(f) according to speed and length of ship

Speed(knot) Length(m)	12	13	14	15	16	17	18	19	20
30	0.34	0.43	0.53	0.64	0.77	0.91	1.05	1.25	1.45
90	0.33	0.41	0.51	0.62	0.74	0.88	1.03	1.21	1.40
150	0.32	0.40	0.50	0.61	0.73	0.87	1.02	1.19	1.37

상사선에 있어서 톤수(D)는 선박의 길이의 3 승에 비례하며, 침수면적(A)은 선박의 길이(L)의 2 승에 비례한다. 따라서 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$D \propto L^3, \quad A \propto L^2, \quad A \propto D^{2/3} \quad (4.11)$$

$$R_f = f D^{2/3} V^2, \quad R_t \propto D^{2/3} V^2 \quad (4.12)$$

선박의 저항(R_t)과 속력(V)[kt]으로 항해하는 선박의 유효마력(P_{EHP})과 지시마력(P_{IHP})의 관계를 정리하면 아래와 같다.

$$P_{IHP} = 0.00686 f D^{2/3} V^3, \quad P_{IHP} = P_{EHP} / \eta_p \quad (4.13)$$

식 (4.13)에서 η_p 는 추진효율이며, $\eta_p/0.00686f$ 을 애드미랄티계수(C)라 한다. 여기서 추진효율은 대형 상선에서 일반적으로 0.6~0.8의 값 가지며, 본 논문에선 0.75로 적용한다. 식 (4.13)를 정리하면 선속 및 배수량에 따른 소요 지시마력은 식 (4.9)와 같이 정리되어 나타낼 수 있듯이 선박의 추진 소요 동력은 선박의 속력의 3 제곱에 비례하는 경향을 보인다. 예를 들면 선박의 정격 속력의 60%에서 운항하는 선박은 정격 출력 대비 약 21%의 출력부하를 갖는다고 할 수 있다. 애드미랄티 계수는 계수(f)와 선형에 따른 방형계수에 따라 Table 4.4와 같이 나타낼 수 있다.

Table 4.4 Admiralty coefficient(C)

선 형	선박의 길이 $L(m)$	방형계수	선속 $V[kt]$	애드미랄티 계 수(C)
단 정	8-14	0.28-0.38	7-10	65-70
대형 요트	60-115	0.40-0.48	12-20	165-170
예선	25-35	0.45-0.50	9-10	110-120
대형 화물선	140-230	0.76-0.78	11-13	240-280
소형 화물선	45-115	0.73-0.78	8.5-11	100-230
화객선	230-270	0.70-0.72	14-16	270-310

본 논문에서는 2,500 TEU 및 6,800 TEU 컨테이너선의 추진에 필요한 소요 마력, 배수량 및 정격 속력을 바탕으로 실제 취득한 선박 데이터를 이용하여 애드미랄티 계수를 보정한다. 가상 선박의 속력에 따른 엔진 출력을 계산하며, 이때 해상상태 및 계절에 따른 영향은 고려하지 않는다. 식 (4.14)를 활용하여 선박 선속-출력의 상관관계를 나타내기 위하여 선박의 재화중량톤수(Dead Weight Tonnage, DWT) 및 애드미랄티 계수를 필요로 한다. 애드미랄티 계수는 Table 4.4의 값을 회귀(regression)하여 전장 210m 및 300m의 선박에 대한 값을 적용한다. 애드미랄티 계수 회귀를 위하여 Table 4.4에서 제공하지 않는 선박의 길이가 210m 및 300m에 해당하는 선속에 따른 계수(f)를 구하면 Table 4.5와 같다. Fig. 4.11은 Table 4.3의 계수 값과 시뮬레이션 대상 선박의 계수 값을 함께 나타낸다.

Table 4.5 Coefficient(f) according to speed of simulation ship length

Speed(knot) Length(m)	12	13	14	15	16	17	18	19	20
210	0.31	0.395	0.495	0.605	0.725	0.865	1.015	1.18	1.35
300	0.297	0.392	0.492	0.602	0.721	0.859	1.012	1.173	1.337

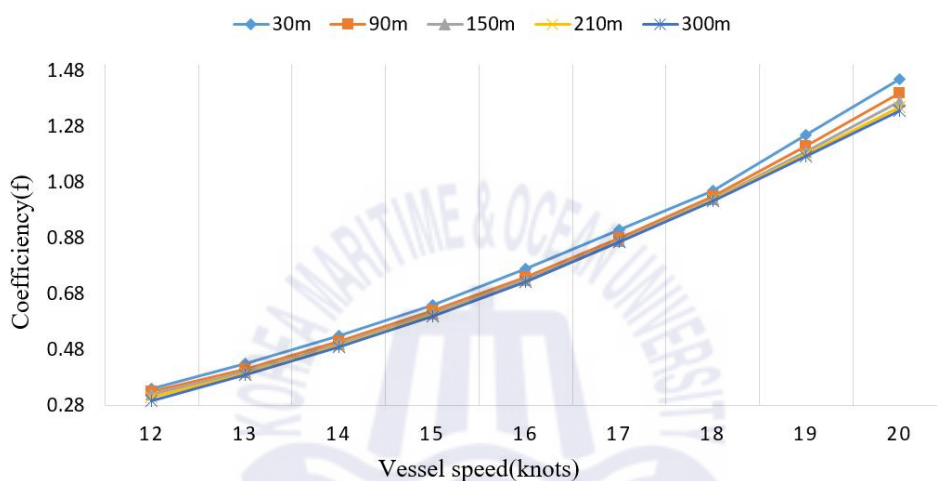


Fig. 4.11 Coefficient(f) according to vessel speed

Table 4.6은 선속이 1knot에서부터 최고 선속인 24knot까지의 선속-선박 길이에 대한 계수를 회귀한 값을 나타내며, Fig. 4.12는 속도에 따른 계수(f) 값을 식 $0.75/0.00686f$ 에 적용하였을 때 에드미랄티 계수값(C)을 타나낸다.

Table 4.6 Coefficient(f) according to speed of simulation vessel length(2)

Speed(knot) Length(m)	3	6	9	12	15	18	21	24
210 m	0.048	0.085	0.15	0.31	0.605	1.015	1.51	1.78
300 m	0.045	0.078	0.13	0.297	0.602	1.012	1.492	1.741

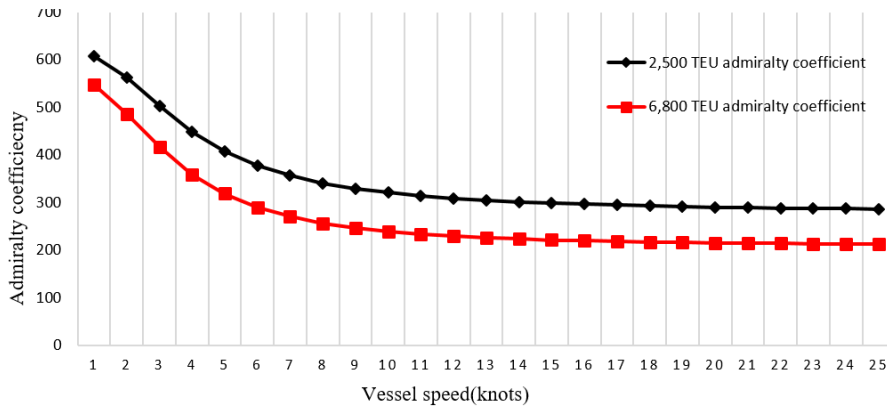


Fig. 4.12 Admiralty coefficient of simulation target vessels

2,500TEU 컨테이너 선박의 재화중량톤수는 Table 4.1에 나타난 32,600 ton으로 적용하며, Fig. 4.12에서 구하여진 선박 선속에 따른 애드미랄트 계수를 식 (4.9)에 적용하면 선속에 따른 필요 출력을 구할 수 있다. 2,500TEU 컨테이너 선박의 애드미랄트 계수 (C)는 다음 식 (4.14)와 같이 다항식 회귀식으로 나타낼 수 있으며, 선속(V)에 따른 필요 출력(P_{IHP})은 식 (4.15)를 이용하여 구할 수 있다.

$$C = 0.75 / (0.00686(-0.023v + 0.0256v^2 + 0.33)) + 280 \quad (4.14)$$

$$P_{IHP} = 0.7457 \frac{32,600^{1.825/3} \times V^3}{C} \quad (4.15)$$

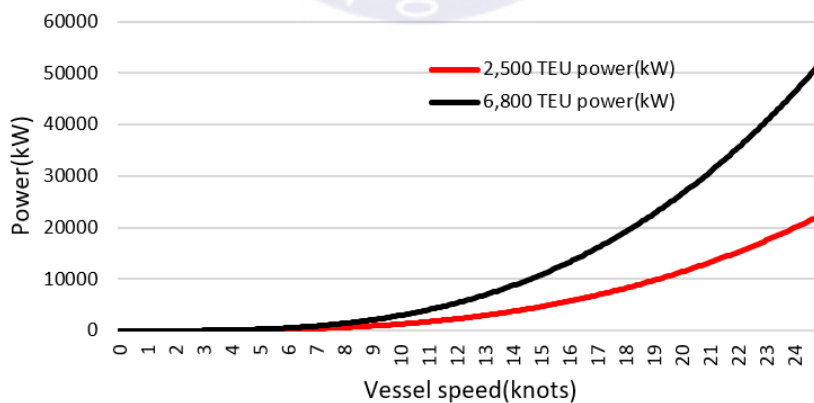


Fig. 4.13 Vessel speed - power curve

4.4 메인 엔진 연료특성 모델

메인 엔진의 출력에 따른 연료 소비량을 직접 계측하는 것이 좋으나, 선박에서 연료 소비량은 일정 기간 동안 총 소비량을 적산하여 측정하므로 출력에 따른 정확한 연료 소비량의 산출은 어렵다. 따라서 본 논문에서는 메인 엔진 제조사에서 제공한 연비특성곡선(Specific Fuel Oil Consumption, SFOC[g/kWh])과 축계 전달 효율을 고려하여 연료 특성 모델을 만든다.

축계 전달 효율이란 프로펠러에서의 전달동력과 디젤엔진으로부터 생산된 축동력의 비를 뜻한다. 일반적으로 저속 디젤엔진의 경우 엔진과 추진축계(shaft)는 직결 연결되며, 고속의 엔진을 탑재하는 경우 프로펠러 효율을 높이기 위하여 축계와 디젤엔진 사이에 감속기어를 설치하여 동력을 전달한다. 따라서 디젤엔진을 이용한 기계식 추진 시스템의 동력전달 과정에서 기계적 마찰 등으로 인한 손실을 야기하게 된다[36]. 시물레이션 대상 선박은 감속기어가 없는 추진 시스템에 고정피치프로펠러(Fixed Pitch Propeller, FPP)를 적용한 것으로 가정하고, 추진축계의 축 효율은 전 영역에서 97%의 일정 값을 적용한다.

실측 선박의 자료를 활용하여 디젤엔진의 연비특성을 알 수 없기 때문에 제조사인 MDT(MAN Diesel & Turbo)에서 제공하는 저속 디젤엔진 특성을 적용한다. 최근 선박에 탑재되는 주 추진기관의 Tier III mode는 환경규제에 대응하기 위하여 이중연료 엔진을 적용하므로 연료유뿐만 아니라 가스 및 pilot oil 또한 함께 고려되어야 하므로 전체적인 연료 소비량의 비교가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 Tier II mode에 따른 연비특성곡선을 적용하기로 한다[78]. Table 4.7은 G90ME-C10.5 디젤엔진의 부하율에 따른 연비특성을 나타낸다.

Table 4.7 SFOC of G90ME-C10.5 Tier II mode

Load Rate(%)	25	37.5	50	62.5	75	87.5	100
SFOC(g/kWh)	168	164.3	161.5	160.1	160.4	161.6	166.8

메인 엔진의 특정 부하율 구간에서 연비특성을 부각시키기 위해 본 논문에서 적용하는 회귀기법은 다항식의 바이스퀘어 피팅 방법이다. 이에 따른 다항식의 차수는 2차부

터 8차까지 차수를 증가시켜가며 평균 제곱근 오차가 가장 작은 값의 차수를 적용하는 것으로 한다. 회귀를 통하여 산출한 엔진부하율(x)에 따른 연료소비율(y)을 산출한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 4.14는 주 추진기관의 연비특성곡선 그래프를 나타낸다.

$$y = 222.00964898 - 6.11553757x + 0.29088035x^2 - 0.0074943x^3 + 0.00010488x^4 - 7.49186046 \times 10^{-7}x^5 + 2.14574435 \times 10^{-9}x^6 \quad (4.16)$$

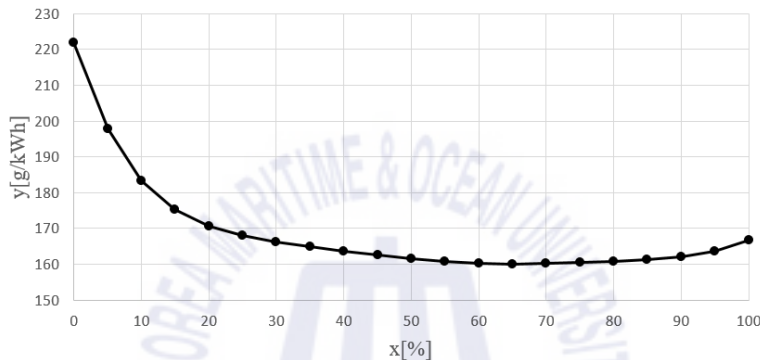


Fig. 4.14 SFOC of diesel engine

4.5 발전기 연료특성 모델

선박은 육상과 달리 독립 전원체계를 구축하고 있다. 즉, 선내에서 필요한 전력은 자체적으로 선박 내에서 생산하고 소비하게 된다. 따라서 소수의 발전기로 운용되는 선박 전력 시스템은 발전 설비의 탈락(shutdown)이나 단락(short) 사고 등에 대한 대비가 필수적이다. 그러나 본 논문에서는 계통이 정상상태일 때의 발전량과 연료 소비량으로 구분하여 분석한다.

대형선박의 경우 발전기로부터 생산되는 전력은 정속도 발전기를 적용하여 50Hz 또는 60Hz의 AC 440V, AC 6,600V의 전력을 생산하며 원동기-발전기의 탈락에 대비하여 일반적으로 2대 이상의 발전기를 운용한다. 이러한 운용방법으로 인하여 간혹 낮은 부하율로 원동기를 운용하게 하는데, 이때 저-부하 운전으로 인한 연비 저하 및 경년변화의 문제를 야기할 수 있다. Fig. 4.15는 참고문헌 [87],[92]에서 선박에 탑재되는 340kVA 발전기, 460kVA 엔진의 부하율에 따른 연비특성곡선을 나타낸다.

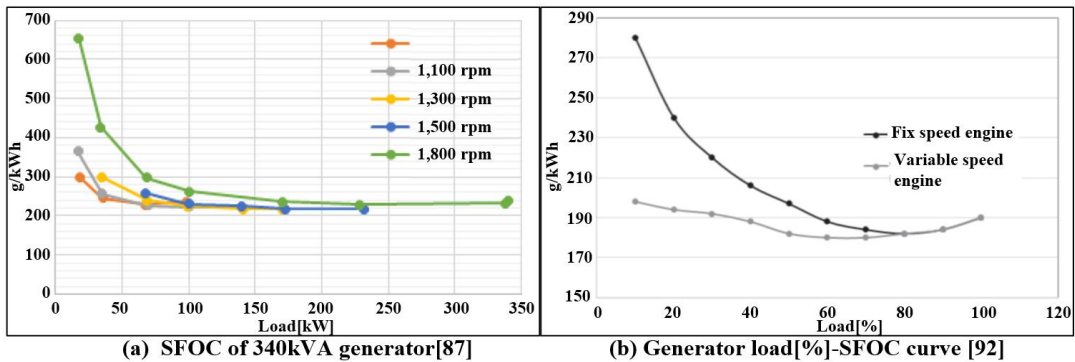


Fig. 4.15 SFOC of generator engine

Fig. 4.15에서 알 수 있듯 정속도 발전기에서 고속의 발전기일수록 저속에서 연비가 나빠진다. 정속도 발전기는 60% 이상의 부하율에서 좋은 연비를 가지며, 30% 이하의 부하율에서는 연비가 급격히 나빠진다. 이처럼 정속도 디젤발전기의 연비특성곡선은 용량 및 정격 회전속도에 따라 다소 연비의 차이가 발생하나, 일반적으로 저-부하에서 연비가 나쁘고 60% 이상의 부하율부터 연비가 좋아짐을 확인할 수 있다[3,88-92]. 본 논문에서는 참고문헌 [92]의 디젤발전기 실험을 통한 부하율에 따른 연비특성곡선을 적용한다. 따라서 본 논문에 적용하는 정속도 발전기의 엔진부하율(x)에 따른 연료소비율(y)은 식 (4.17)과 같이 적용한다.

$$\begin{aligned}
 y = & 280.846986 - 3.140953x + 0.097936x^2 \\
 & - 0.004124x^3 + 8.34488 \times 10^{-5}x^4 \\
 & - 6.662 \times 10^{-7}x^5 + 9.065506 \times 10^{-10}x^6 \\
 & + 7.668684 \times 10^{-12}x^7
 \end{aligned} \quad (4.17)$$

Fig. 4.15처럼 정속도 발전기의 효율은 저-부하에서 낮아지는 현상을 가짐을 확인할 수 있다. 이러한 문제와 더불어 최근 환경문제 및 운항비 절감의 문제가 크게 대두되면서 가변속 발전기에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[5,42,50,87,92,93]. 가변속 발전기에 원동기는 부하량에 따라 원동기의 회전 속도가 변하므로 원동기의 낮은 부하 즉, 원동기의 회전속도가 낮을 때 출력은 정격 최대출력보다 감소한다[94]. 이러한 문제를 해결하기 위하여 가변속 발전기는 별도의 전력 변환 장치를 필요로 한다. 가변속 발전기의 연비특성곡선은 정속도 발전기의 엔진부하율(x)에 따른 연료소비율(y)은 동일하게 참고문헌 [92]의 실험값을 적용한다.

$$y = 215.04429 - 2.84737x + 0.14758x^2 - 0.00404x^3 + 5.72682 \times 10^{-5}x^4 - 4.12578 \times 10^{-7}x^5 + 1.2108710^{-9}x^6 \quad (4.18)$$

가변속 발전기의 특성상 발전기에서 생산된 전력을 배전반에 바로 사용하기에는 어려움이 있다. 이는 발전기에서 생산되는 전력은 주파수 성분을 갖는 교류전력으로 발전기 부하율에 따라 지속적으로 주파수 및 전압의 크기가 변하기 때문이다. 따라서 특수한 경우 가변속 발전기를 탑재한 선박에 단순히 정류기를 거쳐 Unregulated DC로 사용하거나 계통 연계 인버터(grid tie inverter)를 활용하여 교류 전원을 배전반에 연결하여 사용할 수 있다.

즉, 가변속 발전기를 탑재하여 일반 상선에서 사용되는 교류 전원을 사용하거나 정전압 기반의 직류 전원을 주 배전반 전원으로 사용할 때 배전반의 전원을 안정적으로 공급 가능한 별도의 부가적인 장치가 필요하다. 이에 따라 가변속 발전기를 탑재할 경우 원동기의 효율 특성과 전력 변환 장치의 효율 특성이 함께 고려되어야 한다. 본 논문에서는 가변속 발전기를 탑재 했을 때 정전압 직류 전원을 사용하는 것으로 가정하여 시뮬레이션을 진행한다.

전력 변환 장치는 참고문헌[36,95,97]에 따른 효율 특성 곡선을 적용한다. 적용하고자 하는 DC/DC 컨버터는 저-부하율은 0~20%까지는 낮은 효율을 가지며, 20% 이상의 부하율에서는 95% 이상의 높은 효율을 가진다.

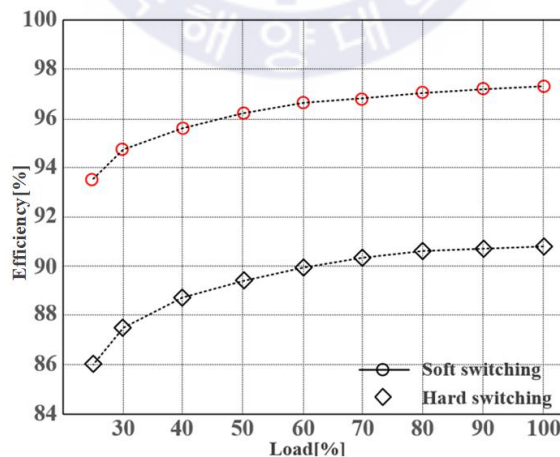


Fig. 4.16 DC/DC converter efficiency[97]

본 논문에 적용하는 컨버터의 효율은 부하율에 따라 94.3%에서 98.5% 범위의 분포를 갖도록 한다. 부하율에 따른 컨버터의 효율($\mu_{conv.}$)은 식 (4.19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_{conv.} = 94.3117 + 0.24892x - 0.00536x^2 + 5.0459610^{-5}x^3 - 1.75003 \times 10^{-7}x^4 \quad (4.19)$$

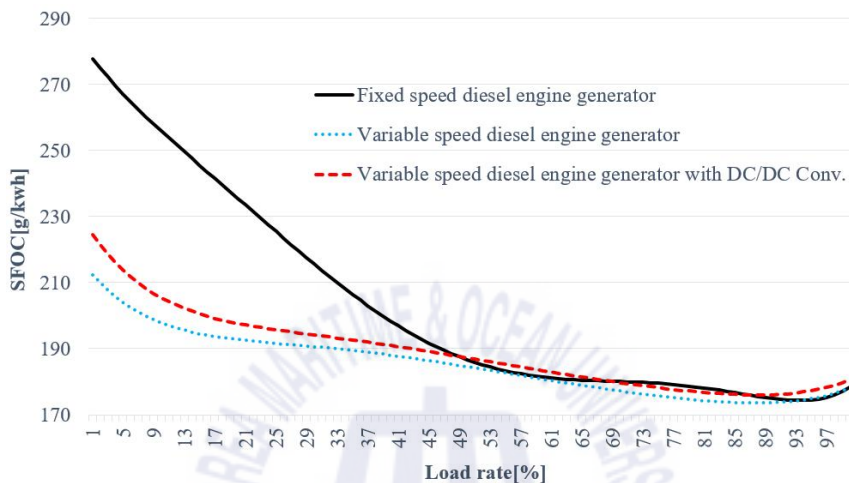


Fig. 4.17 SFOC of generator engine

Fig. 4.17은 발전기 종류 및 적용에 따른 연비특성을 나타낸다. 정속도 발전기의 경우가 변속 발전기에 비하여 저-부하에서 연비특성이 나쁨을 확인할 수 있다. 그러나 발전기의 부하율이 60%이상에서는 연비특성이 유사함을 확인할 수 있다. 이는 정속도 발전기를 설계할 때 고-부하에 최적화 하여 발전기를 설계하기 때문이다.

가변속 발전기를 탑재하여 선박에 적용할 경우 발전기의 저-부하에서 원동기 자체의 효율은 높아지나, 발전기의 회전속도에 따라 출력되는 전력의 주파수 및 전압이 변동하므로 선박 배전반에 전력 공급을 위해 추가적인 전력 변환 장치를 필요로 한다. 따라서 가변속 발전기를 탑재할 경우 전력 변환장치의 효율을 함께 적용하여야 한다. 따라서 고-부하에서의 연비특성은 가변속 발전기와 정속도 발전기가 비슷하더라도 전력 변환 장치의 효율로 인하여 가변속 발전기가 고-부하에서 연비특성이 나쁘다.

4.6 추진 전동기 효율 모델

전력 변환 장치의 기술 발달에 따라 여러 종류의 전동기가 선박용 추진기로 탑재되고 있다. 선박용 대용량의 추진 전동기는 일반적으로 유도 전동기, 동기 전동기, 영구자석 전동기, 초전도 전동기 등이 고려되어 탑재된다. 프로펠러의 동력을 전달하기 위하여 전동기와 프로펠러 사이에 감속기어를 설치하거나, 감속기어 없이 직접 연결하여 사용하는 경우도 있다.

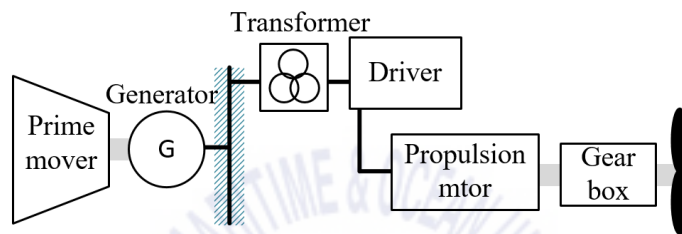


Fig. 4.18 Electric propulsion system

기계식 추진 시스템은 원동기의 출력이 축계를 통하여 직접적으로 프로펠러에 전달되므로 기계적 손실만 적용되지만, 전기식 추진 시스템은 발전기로부터 생산된 전력이 전동기 드라이버를 통하여 추진 전동기까지 공급되는 과정에 기계적 손실과 전기적 손실이 복합적으로 적용된다[79,80]. 즉, 독립 전원체계로 발전기에서 생산되는 전력은 손실과 소비전력의 합이 되어야 한다. 따라서 선박 전력 시스템의 설계는 발전기, 스위치보드 및 기타 전력변환 장치로부터의 손실을 고려되어야 한다. 전형적인 대형선박에서는 각 구성요소에 대하여 정격 출력일 때 다음과 같은 손실을 가진다[79-84].

- 발전기 효율 : 0.95~0.97
- 스위치보드 효율 : 0.999
- 변압기 효율 : 0.99~0.995
- 전력 변환 장치 효율 : 0.95~0.98
- 추진 전동기 효율 : 0.95~0.98

따라서 전기 추진 선박의 경우 기계식 추진 시스템에 비하여 Fig. 4.19와 같은 동력 손실이 발생하게 된다.

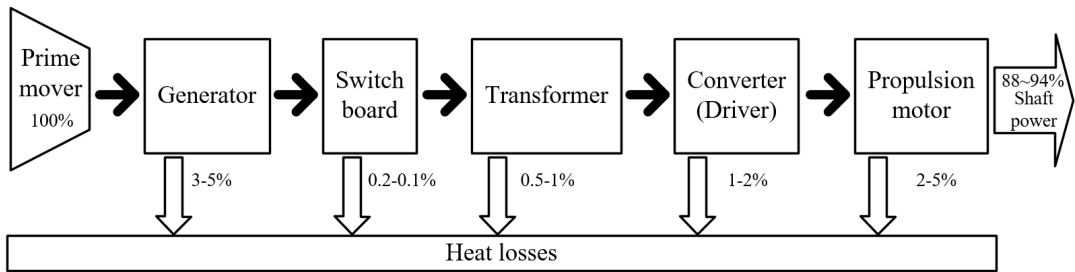


Fig. 4.19 Propulsion system loss of diesel-electric

본 연구에서는 비교적 저렴하고 제어가 간편한 유도 전동기를 대상으로 하여 출력 및 효율 특성 모델을 설계한다. 유도 전동기는 AFE 방식의 전력변환 장치를 적용하여 정류기 기능과 동시에 유도 전동기의 속도 제어에 사용되는 가변 주파수 제어(Variable Frequency Drive, VFD) 기능도 함께 수행할 수 있다. 또한 추진 전동기를 축 발전기 모드(PTO mode)로 적용하여 추진기관으로부터 발생된 에너지의 일부를 선내 서비스 전력으로 사용할 수 있어 본 연구에 적합한 것으로 판단된다[7,15]. 유도 전동기 및 VFD 장치의 부하율에 따른 효율은 식 (4.20), 식 (4.21)과 같이 적용한다[84-86].

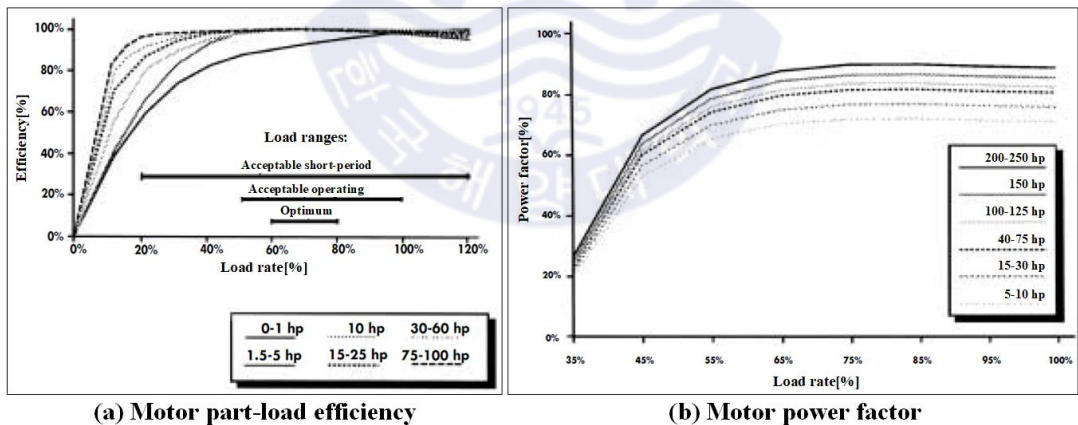


Fig. 4.20 Electric motor load and efficiency[85]

$$\eta_{PM} = 79.6297 + 0.5387x - 0.004x^2 \quad (4.20)$$

$$\eta_{VFD} = \begin{cases} 50 + 5.1572x - 0.1572x^2 & , x \leq 12 \\ 85.7572 + 0.3133x - 0.0018x^2 & , x > 12 \end{cases} \quad (4.21)$$

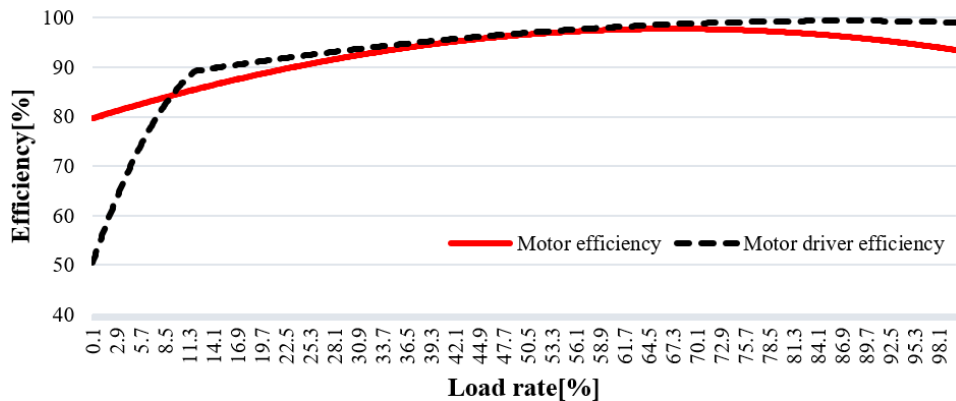


Fig. 4.21 Efficiency of motor and motor driver

PTI mode의 경우, 발전기의 생산전력이 추진 전동기에 공급되어 프로펠러에 동력을 전달하기까지 많은 에너지 변환 장치를 필요로 하며, 여기서 각 변환 단계마다 손실이 발생한다. 이러한 손실에는 앞서 설명한 것과 같이 전동기 및 주파수 제어 장치에서의 손실 외에 스위치보드와 변압기에 의한 손실이 추가되어야 한다. 시뮬레이션에서 스위치보드 및 변압기 손실은 1%로 하여 진행한다.

4.7 배터리 효율 모델

선박은 발전기 탈락 등과 같은 비상 상황에 대응하기 위하여 비상발전기 또는 배터리를 탑재하여 안정적으로 전력을 공급할 수 있도록 한다. 본 논문에서 비상 상황에 대응하기 위한 비상용 배터리 대신 스위치보드에 직접 연결하여 선박 부하에 따라 전력을 공급하거나 충전하는 에너지 저장 장치로서의 배터리를 적용하기로 한다. 앞서 2장에서 언급한 것과 같이 배터리의 충-방전 활동을 통하여 발전기를 높은 연비 구간에서 사용할 수 있도록 하여 연료 소비량을 저감한다[33,93,96].

리튬 계열의 배터리 생산업체는 국내의 경우 삼성SDI, LG화학, SK모바일에너지, 코캄 등이 있으며, 국외의 경우 산요(일본), 파나소닉(일본), BYD(중국), SAFT(프랑스), GAIAC(독일), Yardney(미국) 등이 있다. 본 논문에서는 코캄의 리튬이온 배터리의 사양을 바탕으로 배터리 모델을 구현한다. 리튬이온전지를 이용한 ESS는 배터리 셀을 직렬 연결

하여 모듈을 구현하고, 모듈을 직-병렬 연결하여 원하는 전압과 에너지를 갖는 배터리 시스템을 구현한다. 배터리 모듈의 사양은 Table 4.8과 같다.

Table 4.8 Specification of battery module

Item	Value
Type of battery	Li-ion battery
Number of cell connections	11S(Serial)
Energy	30.1kWh
Voltage	Max : 46.2 V
	Nom : 40.7 V
	Min : 33.0V
Weight / Volume	260kg / 132L

배터리의 상태를 나타낼 때 배터리의 충전상태와 건강상태(State Of Health, SOH)를 사용한다. 배터리 충전상태는 배터리의 현재 에너지 충전량을 백분율로 나타낸 것이며, SOH는 배터리의 충-방전 횟수 및 온도 등의 복합적 영향으로 인한 수명을 나타낸다. 배터리의 사용 횟수가 많아지게 되면 성능이 저하되거나 100% 충전하더라도 초기 생산 상태의 배터리 용량을 가지지 못한다. 이렇듯 배터리의 상태를 SOC 및 SOH를 이용하여 나타내나, 본 논문에서는 배터리의 SOC를 기준으로 충-방전 제어를 수행하므로 배터리의 SOH를 고려하지 않는다.

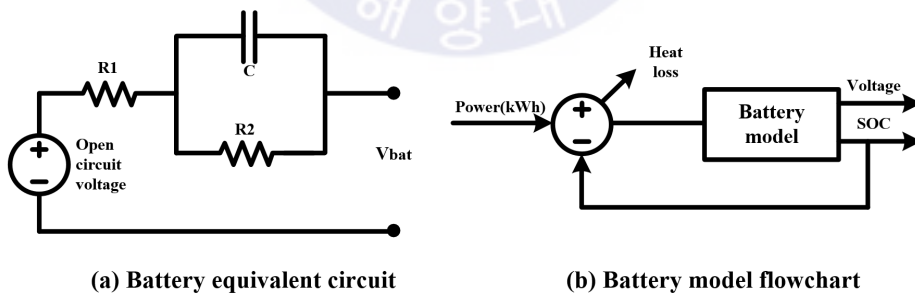


Fig. 4.22 Battery equivalent circuit and model flowchart

Fig. 4.22는 배터리 등가회로 및 시뮬레이션 모델 흐름도를 나타낸다. 배터리 등가회로에서 저항 R_1 과 R_2 는 배터리의 내부 저항으로 배터리의 충전상태, 외부 온도, 출력 또는 충전 전류 밀도에 따라 변화하게 된다. 이에 따라 배터리를 충-방전할 때 내부 저

항으로 인하여 에너지 손실이 발생하게 된다. 즉, 실제 충전 또는 방전하는 전력량에 비하여 이용할 수 있는 에너지가 작다. 이러한 손실률은 배터리의 외부 환경 및 충전 방법 등에 따라 달라진다. 이러한 손실에 따른 효율을 배터리 충·방전 효율이라고 하며, 리튬이온 배터리의 경우 효율은 약 90%이상으로 측정된다[98,99]. 따라서, 본 논문에서 적용하고자 하는 배터리의 충·방전효율은 모든 출력 및 방전구간에서 효율을 94%로 적용하여 전력량을 시뮬레이션 한다.

앞서 기술한 것과 같이 배터리의 출력 전압은 배터리의 상태 및 외부환경에 따라 변동하게 된다. 이러한 전압의 변화로 인하여 잠수함과 같이 특수한 환경에서 사용하는 Unregulated DC를 사용할 때, 배터리를 스위치보드에 직접 연결하여 사용가능하다. 그러나 스위치보드의 전압이 일정한 전압을 갖춘 직류 전압이거나 교류전압일 경우 배터리에서 출력되는 전력을 바로 사용할 수 없으므로 별도의 전력 변환 장치를 거쳐 전력을 공급할 필요가 있다. 직류 전압의 경우 배터리와 스위치보드 사이 양방향 컨버터의 효율은 식 (4.19)의 DC/DC 컨버터의 효율(η_{conv})과 동일하게 적용하며, 계통 연계 인버터를 적용할 경우의 부하율(x)에 따른 효율(η_{grid})은 참고문헌 [100,101]를 참조하여 식 (4.22)와 같이 적용한다.

$$\eta_{grid} = 90.8117 + 0.24892x - 0.00536x^2 + 5.04596 \times 10^{-5}x^3 - 1.75003 \times 10^{-7}x^4 \quad (4.22)$$

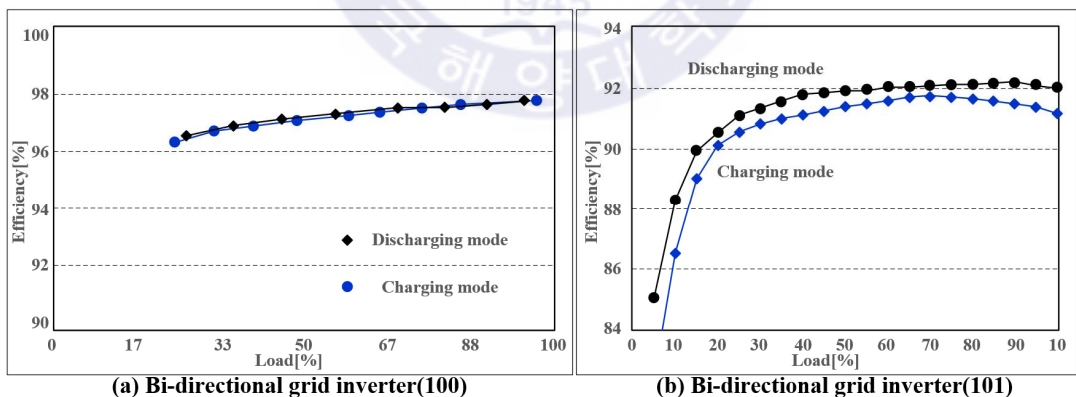


Fig. 4.23 Bi-directional grid inverter efficiency curve

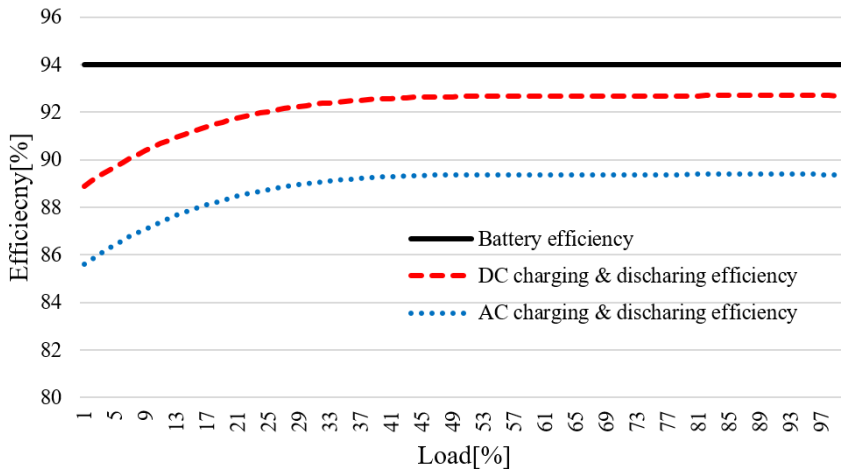


Fig. 4.24 Efficiency curve according to battery model load ratio

시뮬레이션에서 적용하는 리튬이온전지의 단위 셀의 용량은 651Ah이며, 직렬로 11개의 셀이 연결되어 하나의 모듈로 구성되도록 하였다. 선박에 탑재되는 배터리의 용량은 모듈의 개수를 변화하여 변경할 수 있도록 구현하였으며, 배터리의 자가방전⁷⁾은 30일에 배터리의 최대 용량의 5%로 설정하였다. 배터리 모델은 스위치보드의 전원의 종류에 따라 DC/DC 컨버터 또는 계통 연계 인버터의 선택적인 적용이 필요하다. 이러한 컨버터의 효율은 앞서 기술한 것과 같은 효율로 적용한다. 배터리 모델의 출력 전압은 방전 및 충전 C-rate를 고려하지 않고 정상상태에서의 전압을 출력하도록 한다.

식 (4.23)은 정상상태에서의 배터리 SOC에 따른 출력 전압을 나타내며, S 는 배터리 셀의 직렬연결 수, P 는 병렬연결 수를 뜻한다. Fig. 4.25는 배터리 모델의 블록 다이어그램을 나타낸다.

$$V = (4.2S) - \left[\frac{0.004(SOC)S}{P} + \ln \frac{0.22(SOC)}{0.008} + 0.8 \ln \frac{100}{SOC} \right] - 15 \quad \text{식 4.23}$$

7) 자가방전 : 배터리가 부하에 연결되지 않아도 방전을 일으키는 화학작용, 유용한 출력을 내는 것이 아니라 배터리 내부에서 소비됨. 배터리의 종류에 따라 자가방전량은 차이가 있으며 배터리가 오래될수록 자가방전량이 많아진다.

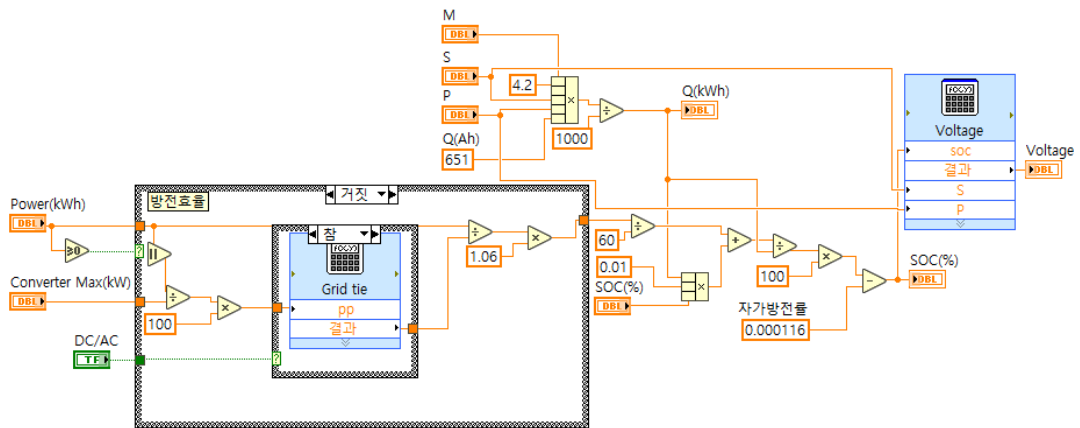


Fig. 4.25 Block diagram of battery model

4.8 축 발전기 효율 모델

4.6절의 전기식 추진 시스템은 추진 전동기를 사용하여 저속에서 비교적 높은 에너지 효율로 선박을 운항할 수 있으며, 전투함과 같이 빠른 속력을 요구할 경우 주 추진 기관과 동시에 운전하여 보다 빠른 속력으로 함정을 운항할 수 있게 한다. 축 발전기 모드는 추진기관에서 발생된 동력 중 일부를 축 발전기로 공급하여 선박 내 전력을 공급하는 것으로 추진 전동기와는 반대의 기능을 수행한다. 대형 선박과 같이 대양에서 정속 운항하는 선박에는 축 발전기를 탑재하여 운항 중 발전기 사용을 줄여 연료절감에 기여하기도 하였다. 그러나 항해 중 선박에 미치는 외력이나 주 추진기관의 문제 등으로 인하여 추진축계의 속력이 안정적이지 못할 경우, 축 발전기를 이용한 전력은 생산량이 불규칙하거나 내연기관이 발달함에 따라 내연기관보다 효율이 좋지 못한 이유로 선박 및 전투함 등에 탑재되지 못하였다. 그러나 최근 전력 전자 기술의 발달로 전압 및 주파수를 안정적으로 모선에 공급할 수 있게 되어 축 발전기의 적용이 보편화될 것으로 사료된다. 특히 양방향 전력변환 장치 중 하나인 AFE 방식의 컨버터 적용으로 PTO mode 및 PTI mode를 하나의 전동기로 구동할 수 있게 되어 보다 활용도가 높아졌다[102-104].

따라서 본 연구에서는 4.6절의 추진 전동기와 동일한 사양의 전동기를 축 발전기로 탑재한다 가정하여 시뮬레이션을 수행한다. 유도 전동기를 동력원으로 사용할 때와 발전기로 사용할 때의 특성은 전동기로 사용할 때보다 발전기로 사용할 때의 정격운용 효율이 약 15.6% 가 높은 것으로 측정되었고[105], 참고문헌 [106]에선 발전기로 사용할 때 전동기로 사용할 때보다 정격운용 효율이 약 5%가 높은 것으로 서로 상이한 결과를 나타낸다. 따라서 본 논문에서는 추진 전동기로 사용할 때와 축 발전기로 사용할 때 효율은 동일한 것으로 하며, 스위치보드의 전력원에 따라 식 (4.19)의 DC/DC 컨버터 효율과 식 (4.22)의 계통 연계 인버터 효율을 적용한다.

축 발전기 모드의 사용은 추진축계의 회전속도가 일정 속도 이하일 때 적용이 불가능하다. 이는 회전속도가 불안정하거나 토크의 부족으로 인하여 안정적인 전력 생산이 어렵기 때문이다[107,108]. 이러한 이유로 PTI mode의 적용은 해군 전투함에서 추진 전동기로 운용하는 함정의 최고속도는 15knot를 목표로 하며, PTO mode의 사용은 함속 10knot 이상일 때 사용하는 것으로 한다[15]. 본 논문에서는 선박의 운항 모드를 정박, 입항 및 출항, 항해의 3가지 모드로 구분하여 그 중 항해 모드에서 축 발전기 모드를 동작하도록 한다. 축 발전기 모드의 동작 조건은 충분한 선속을 가질 때 전력을 생산할 수 있도록 하기 위하여 선속에 따른 히스테리시스 제어를 수행한다. 히스테리시스 제어는 선속이 11knot 이상일 때 축 발전기 동작을 시작하여 선속이 9knot 이하일 때 동작을 정지하도록 한다. 축 발전기의 용량은 선박에 탑재되는 발전기 1대 이상의 용량을 가지는 것을 지양하는 것으로 하며, 전투함 등에서 추진 전동기를 이용하여 15knot 이상의 함속을 가지도록 하는 것과 달리 입항 및 출항 때 메인 엔진을 대신하여 운항할 수 있도록 10knot 전후의 속력을 가질 수 있는 출력으로 한다.

제 5 장 시뮬레이션

본 장에서는 가상 선박의 추진 및 전력 시스템을 4장에 따른 구성 변화와 3장에 기술한 알고리즘을 적용하여 에너지 효율 비교 및 분석을 위한 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션에 사용되는 모델은 실제 선박에 탑재되는 장비의 정확한 사양 및 효율을 확인할 수 없으므로 실제 운항 선박에서 취득한 데이터, 장비 제조사의 사양서 및 여러 논문 자료를 바탕으로 3장에서 설계한 모델을 적용한다. 또한 기존 선박에 탑재되어 운용되는 전력 관리 시스템과 본 논문에서 제안하는 선박 구성에 따른 통합 기관 제어 시스템 적용에 따른 에너지 효율을 비교 및 분석한다.

정확한 에너지 효율을 비교하기 위하여 실제 운항 중인 선박의 실시간 데이터를 적용하는 것이 바람직하나, 실제 운항 데이터를 수집하는 것이 어려우므로 과거 H선사의 운항 데이터를 사용하여 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션 대상 선박은 2,500 TEU 컨테이너 선박 1척 및 6,800 TEU 컨테이너 선박 1척으로, 총 2척에 대한 데이터를 적용하여 시뮬레이션을 진행한다. 선박에 따라 수집 데이터 항목 및 수집 주기가 다르므로 3장에 나타내듯이 데이터 보간을 통하여 1분 간격의 일정한 규칙을 갖도록 데이터를 보정하여 사용한다. 시뮬레이션은 NI(National Instrument)사의 LabVIEW를 이용한다. 시뮬레이션의 입력 데이터는 Table 5.1과 같다.

Table 5.1 Input data of simulation

Acquisition Data List	Unit	Acquisition Data List	Unit
Main Engine Power	kW	Main Engine Max Power	kW
Ship State	State ⁸⁾	Generator Max Power	kVA
No.1 GE Load	kW	No. 1 GE Run/Stop	Run/Stop
No.2 GE Load	kW	No. 2 GE Run/Stop	Run/Stop
No.3 GE Load	kW	No. 3 GE Run/Stop	Run/Stop
No.4 GE Load	kW	No. 4 GE Run/Stop	Run/Stop

8) 0 : In port / 1 : Standby / 2 : At Sea

5.1 2,500 TEU 컨테이너선

① User operation profile

2,500 TUE 컨테이너선은 2013년 07월 26일부터 2013년 9월 4일까지, 약 32일간의 데이터를 시뮬레이션 입력 값으로 사용한다. 시뮬레이션 대상 선박의 주요 제원은 Table 4.1과 같다.

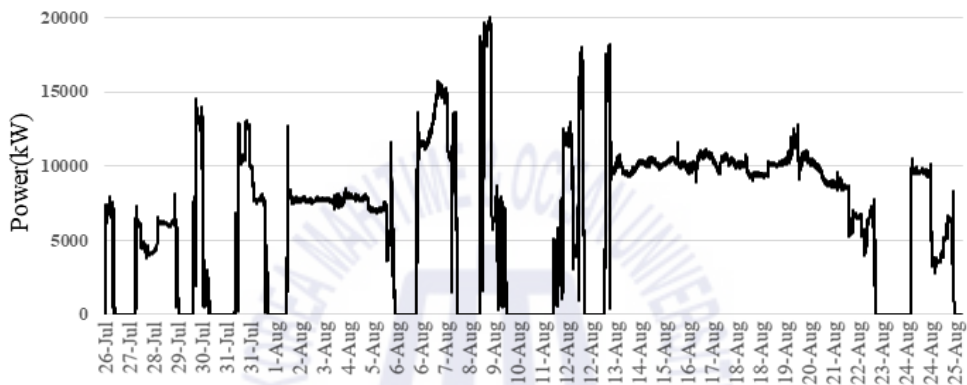


Fig. 5.1 Main engine power

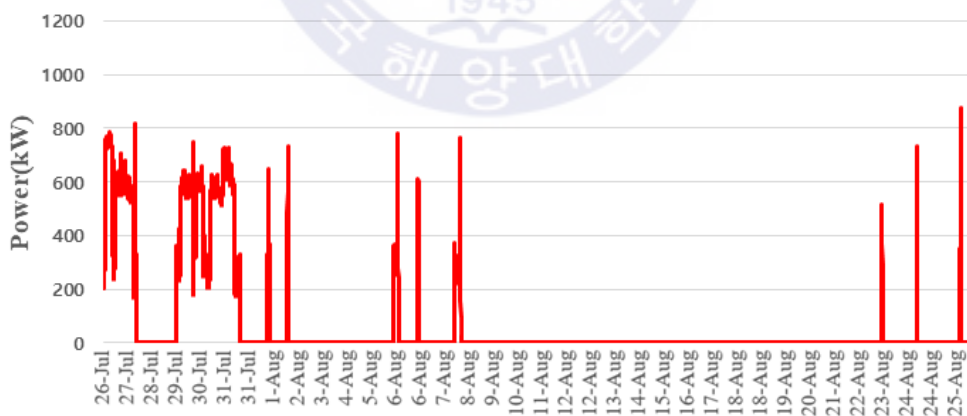


Fig. 5.2 No.1 generator power

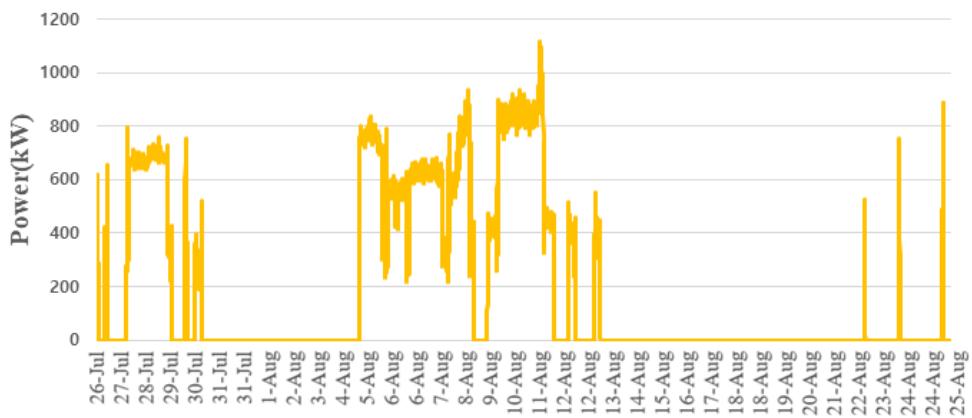


Fig. 5.3 No.2 generator power

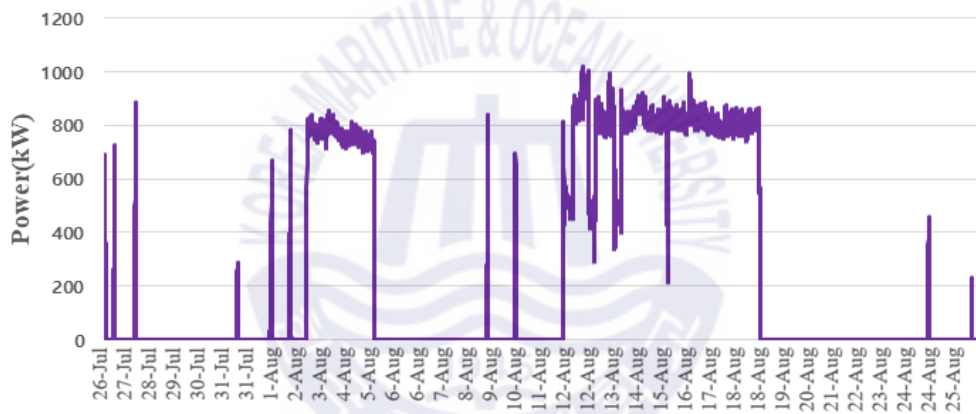


Fig. 5.4 No.3 generator power

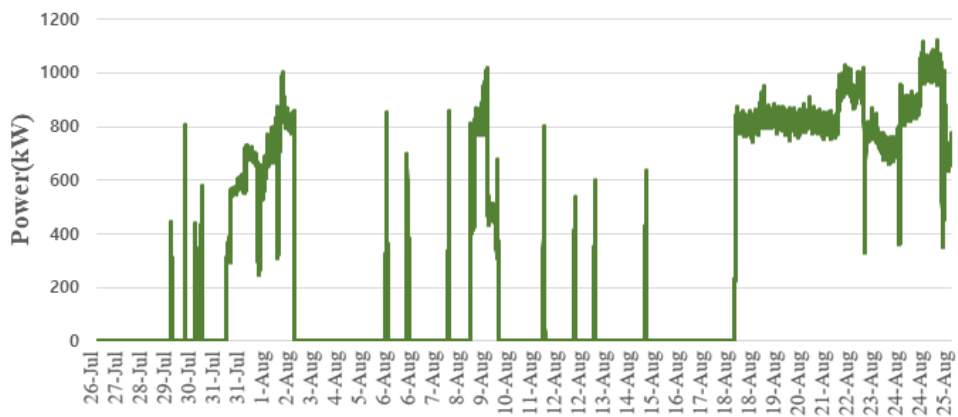


Fig. 5.5 No.4 generator power

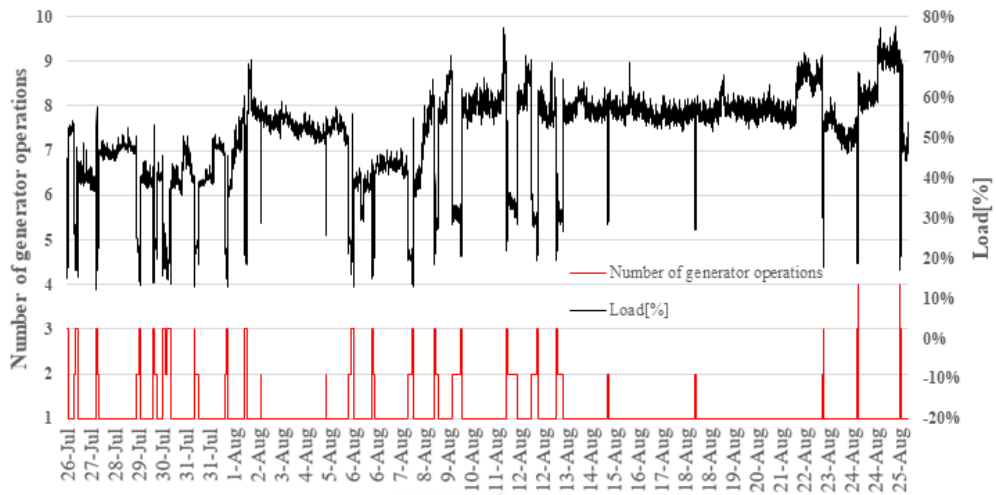


Fig. 5.6 Number of generator operations and load rate

Fig. 5.6은 선박 운항 모드에 따른 발전기 운전 대수와 부하율을 나타낸다. 항해중인 선박은 일반적으로 발전기 1대만 운전하여 선내 전력을 공급하고 있음을 확인할 수 있으며, 입항 및 출항 시 바우스러스터 및 보조 블로워 등의 고-부하 장비 사용으로 인하여 2대 이상의 발전기를 운전함을 확인할 수 있다. 또한, 다수의 발전기를 운전할 때 순간적으로 평균 전력 부하가 급격하게 감소함을 확인할 수 있다. 이는 짧은 시간 동안 높은 전력량을 갖는 부하를 반복적으로 사용할 수 있도록 발전기를 병렬 운전한 결과이다. 즉, 발전기 한 대만으로는 전력을 안정적으로 공급하기 어려우므로, 발전기를 병렬운전 하여 저-부하상태로 운용하게 되는 것이다.

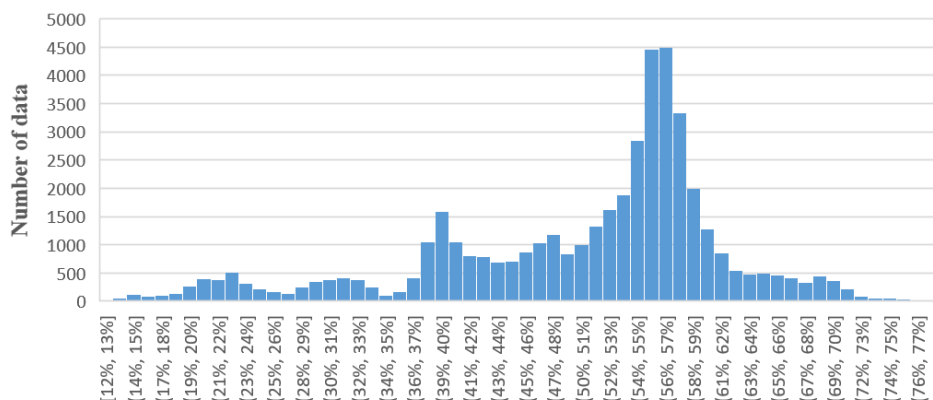


Fig. 5.7 Histogram of generator load rate

Fig. 5.7은 발전기 평균 부하율 히스토그램을 나타낸다. 히스토그램을 분석하면, 40% 이하의 저-부하로 운전되는 시간이 적지 않게 있으며, 54%~58% 부하율로 운전한 시간이 가장 많음을 확인할 수 있다.

2,500 TEU 컨테이너 선박의 주 추진기관과 발전기 4대에서 소비한 연료유를 계산하기 위하여 3장에서 설계한 주요 장비의 시뮬레이션 모델을 활용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 발전기의 연료 소비량은 발전기 부하율에 따른 연비특성(g/kWh)을 분당 연비특성으로 적용 후 생산하는 전력을 곱하여 나타낸다. Fig. 5.8는 연료 소비량 시뮬레이션 프로그램의 블록 다이어그램을 나타낸다. 입력 데이터는 2,500 TEU 컨테이너 선박의 취득 데이터를 1분 간격으로 보간한 데이터를 사용하며, 부하율에 따른 연비특성 적용을 위하여 선박 주요 제원인 메인 엔진의 최대 출력과 발전기의 최대 출력을 입력 변수로 사용한다. 시뮬레이션을 통한 연료 소비량은 약 32일간의 운항기간 동안 메인 엔진에서 789,119kg, 4대의 발전기에서 112,892kg 소비하여 총 902,011kg의 연료유를 소비하였다.

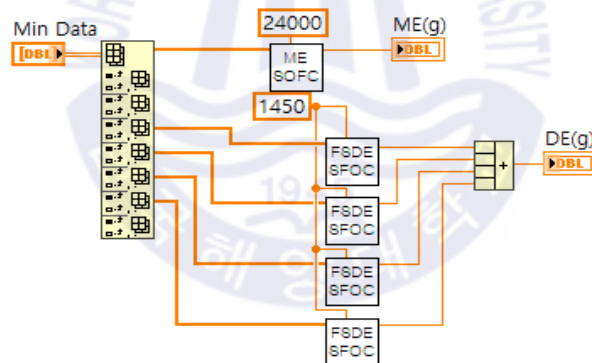


Fig. 5.8 Block diagram of fuel consumption simulation

② User operation profile(vsg)

기계식 추진 시스템이 탑재된 실제 운항선박의 발전기 운용 프로파일을 보면 낮은 부하율에서 운용되는 비율이 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 원동기-발전기의 특성상 시간이 지나면서 효율이 저하되는 점, 대용량의 전동기 사용으로 인한 갑작스런 기동 부하에 대응해야 하는 점, 그리고 인덕티브 성분 부하로 인한 역률 저하 등을 고려하

여 발전기 용량에 여유분을 더하여 설계하기 때문이다. 그러나 가변속도 발전기 기반의 직류전력을 적용하면 역률로 인한 무효전력을 제거할 수 있으며, 별도의 전류 맥동을 제거하기 위한 커패시터를 설치하여 비교적 쉽게 고조파 왜곡을 억제할 수 있다. 이는 교류전력에서 고조파 전류 억제를 위하여 복잡한 설비를 필요로 하는 것에 비하여 큰 이점이다.

가변속 발전기를 탑재하여도 [①User operation profile(pp.73)]와 동일하게 기계식 추진 시스템으로 구성되므로 추진 시스템과 전력 시스템은 독립적으로 운용된다. 따라서 가변속 발전기 탑재와 무관하게 추진 시스템이 운용되므로 시뮬레이션을 통한 추진 시스템에서 소비하는 연료유량은 [①User operation profile]에서 메인 엔진이 소비하는 연료유량과 동일하다.

반면에 정속도 발전기가 아닌 가변속 발전기를 탑재함에 따라 발전기의 연료 소비량에 차이가 발생한다. 정속도 발전기에서 생산하는 전력량을 가변속 발전기에서 생산하기 위해서는 가변속 발전기의 교류전력을 직류전력으로 변환하는 컨버터의 효율을 고려하여야 한다. 따라서 가변속 발전기의 연료 소비량은 식 (5.1)과 같이 나타낼 수 있으며, 식 (5.1)에서 P_{vsg} 는 가변속 발전기의 필요 출력이며, P_{fsg} 는 정속도 발전기에서 생산하는 전력, η_{conv} 는 컨버터의 부하율에 따른 효율을 뜻한다. Fig 5.9는 가변속 발전기 연료 소비량 프로그램의 블록 다이어그램이다.

$$P_{vsg} = P_{fsg} / \eta_{conv} \quad (5.1)$$

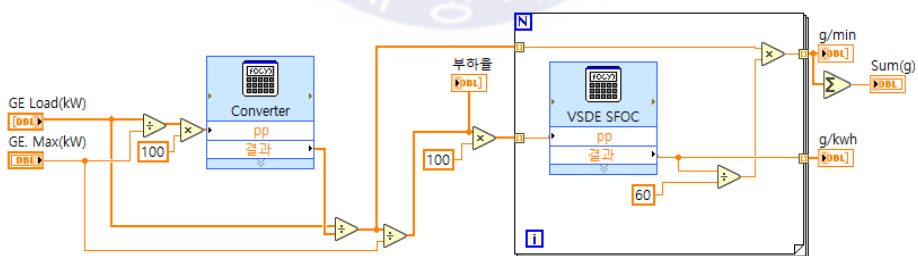


Fig. 5.9 Block diagram of variable speed generator for fuel consumption simulation

시뮬레이션을 통한 연료 소비량은 약 32일간의 운항기간 동안 메인 엔진에서 789,119kg으로 [①User operation profile]과 동일하며, 발전기의 총 연료 소비량은 110,955kg으로 약 32일간의 항해로 약 2,000kg의 연료를 절약할 수 있다.

③ PMS_(FSG)

실제 선박을 운항하는 운용자는 발전기의 내용연수에 따른 성능 저하 및 특수한 상황에서의 안정성 등을 경험적으로 판단하여 발전기를 운전하는 경우가 있다. 이러한 이유로 선박에 탑재되어 있는 선박 전력 관리 시스템의 운용 알고리즘과 다소 다른 운용 결과를 가져오기도 한다. 본 절에서는 선박 전력 부하율을 나타내는 Table 3.3 발전기 부하분담 운전/정지 알고리즘에 따라 동작하는 3.2.3절(pp.29)의 전력 관리 시스템을 적용하였을 때 연료 소비량을 계산한다.

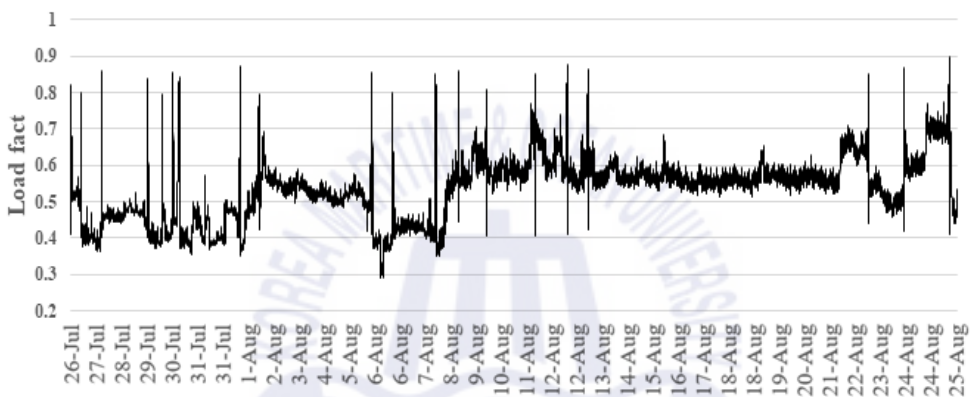


Fig. 5.10 Generator load rate of ideal PMS

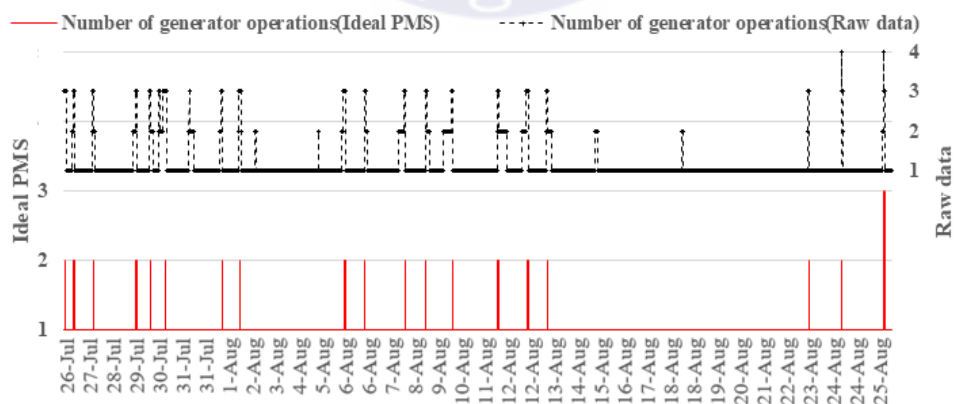


Fig. 5.11 Number of generator operations at ideal PMS

시뮬레이션 진행 결과, [①User operation profile(pp.73)]에서는 선박이 입항 및 출항할 때 최소 2대 이상의 발전기를 운용하며, 최대 4대의 발전기를 운용하는 경우도 있다. 그러나 전력 관리 시스템을 적용할 경우 항해 중 1대의 발전기를 운용하여 충분한 선내 전력 공급이 가능하였으며, 입항 및 출항 시 2대의 발전기를 운용한다. [①User operation profile]의 경우 4대의 발전기를 운용한 구간에서 이상적 전력 관리 시스템을 적용하면 3대의 발전기로 안정적인 전력 공급이 가능했다. Fig 5.10과 5.11은 정속도 발전기가 전력 관리시스템에 따라 동작하였을 때 발전기의 평균 부하율 및 운전 대수를 나타낸다.

[①User operation profile]에서의 발전기 평균 부하율은 50.17%로 확인되나, 전력 관리 시스템 알고리즘을 적용하였을 경우 평균 부하율 약 53.7%로 [①User operation profile]보다 3.53% 높은 평균 부하율을 가짐을 확인할 수 있다. 메인 엔진에서의 연료 소비량은 789.119kg이며, 발전기의 연료 소비량은 110.170kg으로 사용자 운용에 따른 연료 소비량에 비하여 약 2.41%의 연료 소비를 줄일 수 있다.

④ PMS_(VSG)

정속도 발전기와 가변속 발전기는 같은 전력을 생산하는 데 소비하는 연료유의 양이 다르다. 가변속 발전기의 경우 높은 속도의 회전수를 유지할 필요가 없으므로 저-부하율에서 연비특성이 나쁜 정속도 발전기에 비하여 비교적 양호한 연비특성을 가진다. 가변속 발전기는 원동기의 저-부하 효율을 높일 수 있어 정속도 발전기에 비하여 저-부하 운전 특성이 양호하지만, 스위치보드 전원의 종류에 따라 별도의 전력 변환 장치를 필요로 할 수 있으므로 전력 변환 과정에서 손실이 발행할 수 있다. 따라서 고-부하에서 발생할 수 있는 전력 변환 손실을 고려하여 운용 개념 및 제어 알고리즘을 적용해야 한다.

가변속 발전기는 정속도 발전기보다 저-부하에서 높은 연비특성을 가지므로 [③PMS_(FSG) (pp.77)]와 동일한 발전기 평균 부하율 및 운전 대수로 운용되더라도 연료 소비량을 절감할 수 있다. 시뮬레이션을 통한 연료 소비량은 899,235kg으로 약 32일간의 운항 기간 동안 약 2.52%의 연료소비를 줄일 수 있다.

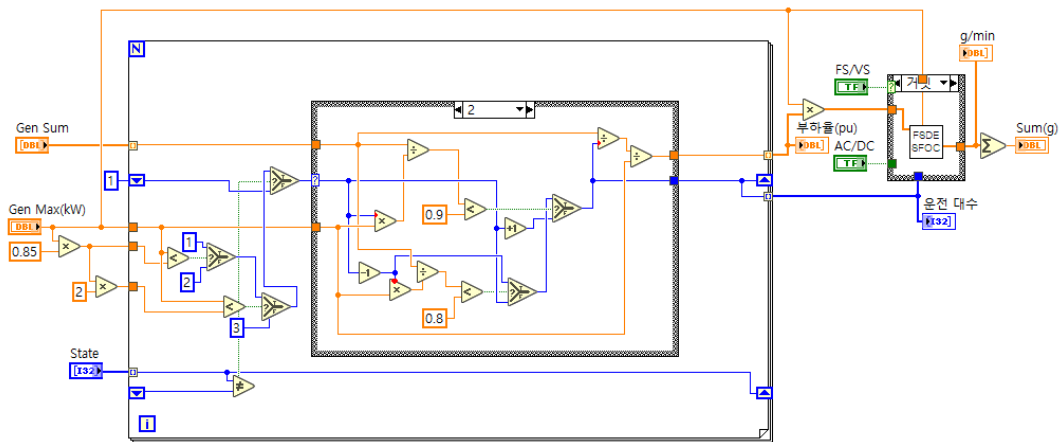


Fig. 5.12 Block diagram of ideal PMS simulation

⑤ PMS_(B-FSG)

배터리 연계형 전력 관리 시스템(PMS_(B-FSG))은 배터리의 충전 및 방전을 통하여 발전기를 최대 효율 구간에서 운전할 수 있도록 한다. 예를 들어, 발전기가 저-부하에서 운전 중일 때는 발전기의 여유 발전량으로 배터리를 충전함으로써 높은 부하율에서 동작할 수 있도록 한다. 또한, 발전기의 병렬운전으로 인하여 낮은 부하율에서 동작할 때는 운전 중인 발전기 1대를 정지한 후 부족한 전력을 배터리가 공급할 수 있도록 한다. 이처럼 배터리를 활용하면 발전기가 저-부하에서 운전되는 시간을 줄여 전반적으로 운용 효율을 높일 수 있다. 시뮬레이션 블록 다이어그램 및 동작 알고리즘은 3.2.4절(pp.31)과 동일하다.

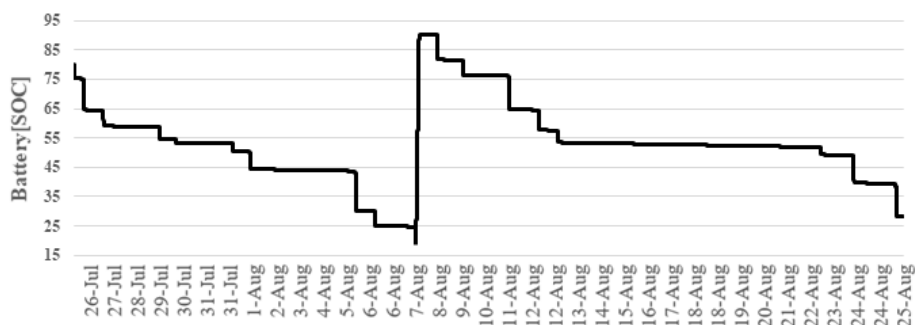


Fig. 5.13 Battery SOC

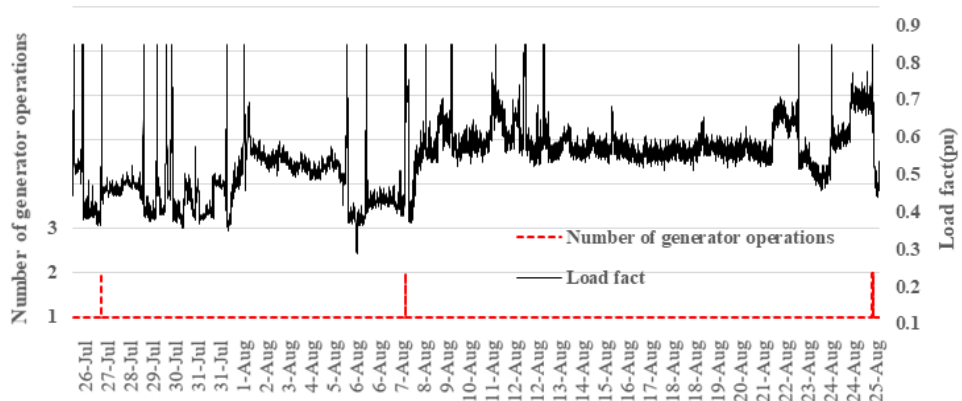


Fig. 5.14 Number of generator operations and load fact

배터리 연계형 전력 관리 시스템은 배터리의 충전 및 방전을 통하여 발전기 운전 대수를 가능한 한 줄일 수 있도록 하며, 다수의 발전기를 운용할 때는 낮은 부하율에서 운전되는 시간을 줄이는 동시에 배터리의 충전 시간을 확보한다.

Fig. 5.14에서 나타나듯 대부분 운항기간 동안 1대의 발전기만을 운용하며, 1대의 발전기 운용만으로 전력이 부족할 경우 배터리를 방전하도록 하여 발전기의 추가 기동을 방지한다. 더불어 배터리에서 방전되는 전력량의 제어를 통하여 발전기의 최고 효율 부하율인 85%에서 운전할 수 있도록 하여 높은 연비구간에서 발전기가 운용될 수 있도록 한다. 발전기 연동형 전력 관리 시스템을 적용하였을 때 발전기의 평균 부하율은 시뮬레이션 결과 약 54.06%로 실제 선박 운항 기간 동안의 발전기 평균 부하율인 50.17%보다 약 3.9% 높게 운용가능하다.

배터리를 적용하였음에도 발전기의 운용 평균 부하율이 다소 낮게 운용되는 것은 2,500 TEU 컨테이너 선박의 항해 및 정박 기간의 운항 시간이 전체 운항기간의 90% 이상이며, 이러한 대부분의 운항 기간을 발전기 1대만을 운용하면서 저-부하로 운용되었기 때문이다. 시뮬레이션 결과 배터리를 연계한 전력공급 시스템의 연료 소비량은 109,894kg으로 기존 선박 대비 약 2.66%의 연료유를 절약할 수 있다.

⑥ PTO_(FSG) mode

주 추진기관은 선박의 노후화로 인한 저항의 증가 및 경년 변화에 따른 추진력 감소 등을 고려하여 필요 출력보다 높은 여유 출력을 고려하여 탑재된다. 이러한 설계는 선박의 운항 일정에 따라 최적 효율 구간에서 운항하지 못하고, 설계된 사양보다 낮은 부하로 운용하게 한다. 이러한 단점을 보완하고 발전기의 운전 대수를 줄이기 위하여 축 발전기를 탑재할 수 있다. 정속도 발전기 기반의 PTO mode(PTO_(FSG))의 시스템 사양 및 동작 알고리즘은 3.2.5절(pp.34)의 운용 사양과 동일하다.

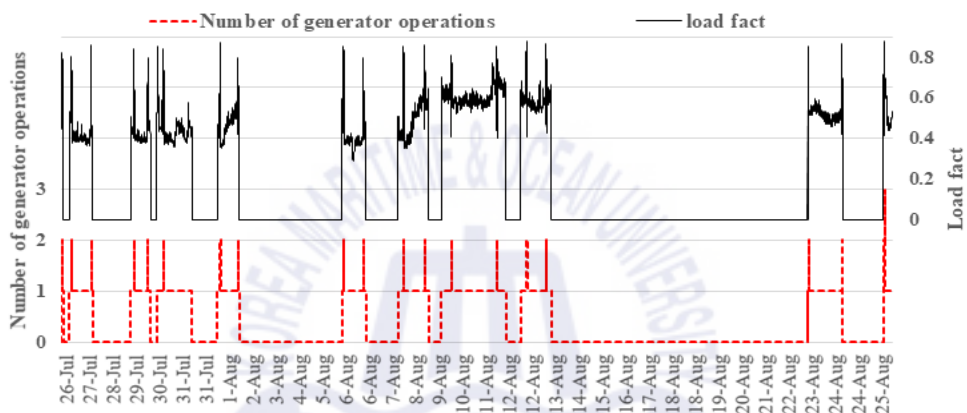


Fig. 5.15 Number of generator operations and load rate

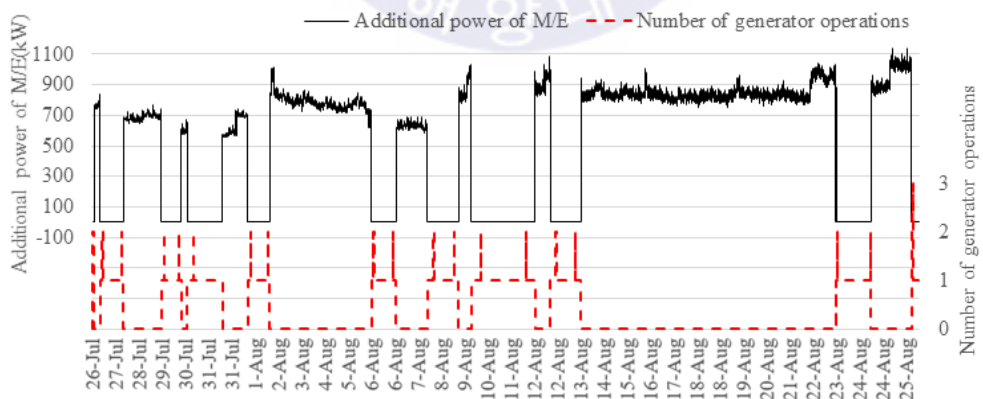


Fig. 5.16 Additional power of main engine and number of generator operations

2,500 TEU 컨테이너 선박의 경우 대부분의 항해 기간 동안 1대의 발전기만 운용한다. 이에 따라 발전기 출력용량과 동일한 용량의 축 발전기를 탑재하게 되면 발전기의 운용 없이 안정적으로 선내 필요 전력을 공급하며 운항할 수 있다.

시뮬레이션 결과, Fig. 5.15에 나타나듯 항해 중 PTO mode 사용할 경우 별도의 발전기 운용 없이 선내 전력을 공급할 수 있음을 확인할 수 있다. 가상 선박의 메인 엔진의 최대 출력은 24,000kW이므로 메인 엔진 최대출력의 약 6%의 출력만으로 항해 중인 선박의 선내 필요 전력을 모두 공급할 수 있다. 그러나 선박이 입항 및 출항과 같이 주 추진기관이 안정적으로 지속적인 출력을 낼 수 없는 상황에서 축 발전기의 사용은 불가하므로 선내 탑재된 디젤 발전기를 운전하여 필요 전력을 공급해야 한다.

더불어 입항 및 출항은 선박의 필요 전력량 변동이 큰 구간으로 바우 스러스터, 보조 블로워 등의 중-부하 사용을 고려할 필요가 있다. 따라서 PTO mode의 적용과 무관하게 선내 안정적인 전력 공급을 위하여 전력 관리 시스템의 동작 알고리즘에 따라 2대 이상의 발전기를 운전한다.

PTO mode에 대한 시뮬레이션 결과 주 추진기관의 연료 소비량은 850,225kg으로 크게 증가하였다. 이는 항해 중 발전기를 운전하지 않고 필요한 전력을 주 추진기관 동력으로부터 변환하여 선내 전력을 공급함에 따라 선속 유지를 위한 축 회전수 유지를 위한 추력 외 추가적인 축 발전기 운전을 위한 동력으로 소모되기 때문이다. 반대로 항해 중 발전기를 운전하지 않음으로 발전기의 연료 소비량은 39,618kg으로 PTO mode를 적용하지 않았을 때와 비교하여 크게 감소하여 총 연료 소비량은 889,873kg로 나타난다.

⑦ PTO_(B-VSG) mode

PTO mode에 배터리를 탑재하여 보다 에너지 유연성을 높이며 발전기를 보다 효율적으로 사용할 수 있다. PTO mode에서 배터리와 가변속 발전기를 탑재한 시스템의 사양 및 동작 알고리즘은 3.2.5절(pp.34)의 운용 사양과 동일하다. 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

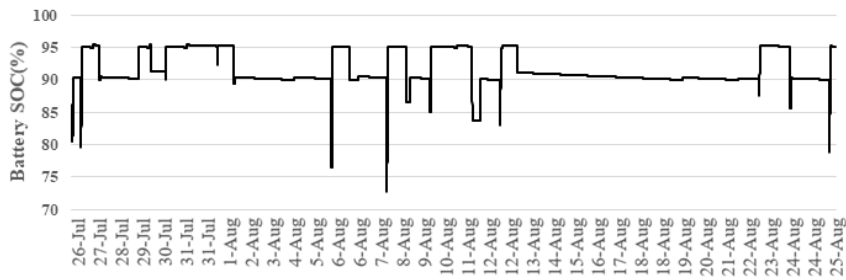


Fig. 5.17 Battery SOC

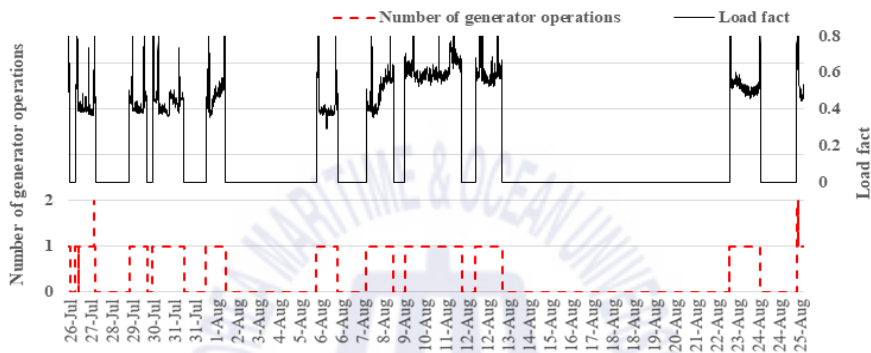


Fig. 5.18 Number of generator operations and load rate

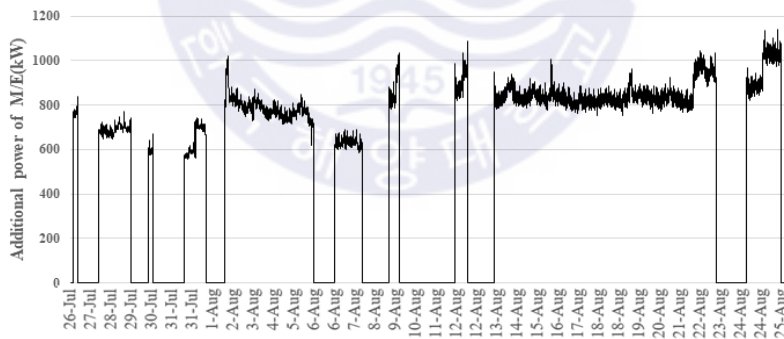


Fig. 5.19 Additional power of main engine

배터리를 탑재함으로써 입항 및 출항 시 1대의 발전기로 바우 스러스터 및 기타 선 내 필요한 전력을 공급하며, 부족한 전력은 배터리에서 공급함을 확인할 수 있다. PTO mode와 주 추진기관의 연료 소비량은 850,337으로 유사하지만, 배터리를 사용함으로써 발전기를 운용할 때보다 높은 부하율로 운용할 수 있어 발전기 연료 소비량은 38,234kg으로 총 연료 소비량을 줄일 수 있다.

⑧ PTO&PTI_(FSG) mode

PTI mode를 사용하게 되면 입항 및 출항할 때 주 추진기관을 대신하여 추진 전동기를 사용할 수 있으므로 환경적인 측면에서 많은 이점을 기대할 수 있다. 더불어 추진 전동기는 주 추진기관과는 달리 저-부하에서도 높은 운전 효율을 가지고, 회전의 정-역 제어가 편리하며, 역 토크를 생성할 수 있어 조종성능 또한 높일 수 있다. 그러나 주 추진기관과 더불어 추진기관을 하나 더 탑재하는 것은 많은 공간을 필요로 할 뿐만 아니라 무게 또한 크게 늘어나게 되는 단점이 있다. 일부 항해사 및 기관사의 경험에 따르면 입항 및 출항 시간은 짧으면 20분, 길면 6시간까지 소요할 수 있고, 선박을 안정적으로 항구에 접안하기 위하여 순간적으로 높은 추력 토크를 요구함에 따라 충분한 출력을 낼 수 있는 추진기관을 탑재해야 한다.

2,500 TEU 컨테이너 선박의 운항 데이터를 보면 입항 및 출항 시 주 추진기관의 출력은 최대 7,000kW 정도로, 주 추진기관 최대 출력 설계 사양인 24,000kW의 약 30%를 필요로 한다. 이러한 큰 용량의 추진 전동기를 탑재한다면 추가적인 발전 설비를 요구함에 따라 기존 선박에 탑재되어 있는 발전체계로는 운용이 어려울 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 선박의 전력체계를 크게 변화시키지 않으면서 운용 가능한 추진 전동기를 탑재하는 것으로 하여 시뮬레이션을 진행한다. PTO & PTI mode의 시스템 사양 및 동작 알고리즘은 3.2.5절(pp.35)의 운용 사양과 동일하다. 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

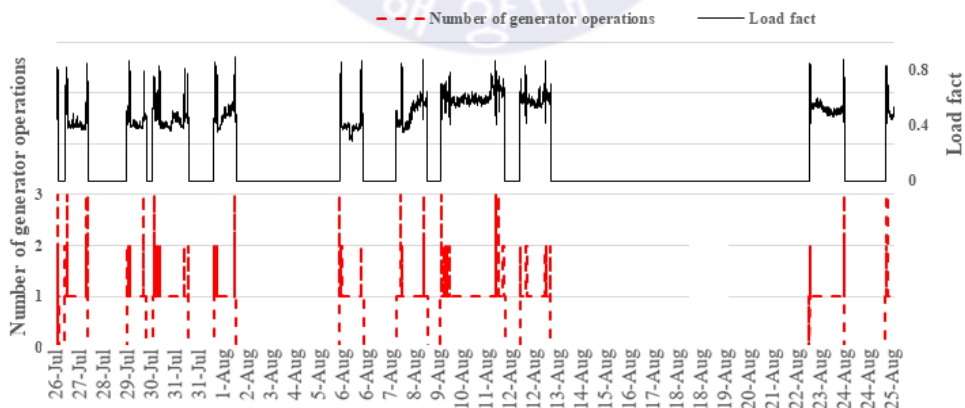


Fig. 5.20 Number of generator operations and load rate

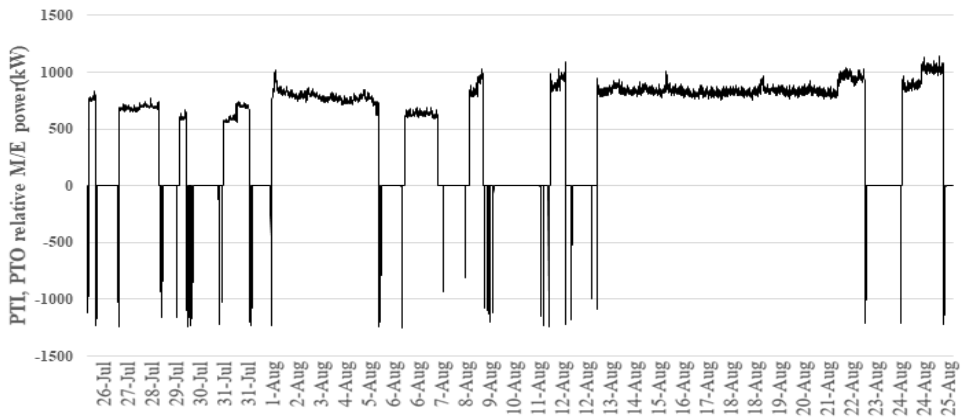


Fig. 5.21 Additional power of main engine

PTO & PTI mode에서 입항 및 출항 중 추진 전동기를 사용하여 최대 3대 이상의 발전기가 운용됨을 확인할 수 있다. 이에 따라 Fig. 5.20에서 나타나듯 입항 및 출항 때 주 추진기관이 운전되지 않고 추진 전동기가 대신 동력을 공급하므로 실제 운항 데이터의 주 추진기관 출력보다 PTI mode에서 음(-)의 동력이 나옴을 확인할 수 있다. 이로 인하여 추진 전동기의 잦은 운전과 정지로 인하여 발전기 운용 대수가 자주 변화는 것을 확인할 수 있다. 발전기의 운전 및 정지가 잦은 것은 발전기의 유지 및 보수에 좋지 않은 영향을 미치므로 선박을 설계할 때 PTI mode적용에 따른 적절한 설계가 필요할 것으로 판단된다. PTO & PTI mode에서 주 추진기관의 연료 소비량은 848,786kg, 발전기에서의 연료 소비량은 40,981kg으로 총 889,767kg의 연료유를 소비하였다.

⑨ PTO&PTI_(B-VSG) mode

배터리의 탑재 유무와 무관하게 PTO & PTI mode에서 추진 전동기의 출력은 최대 1,450kW로 설정하여 시뮬레이션을 진행한다. 배터리를 연계한 PTO & PTI mode는 배터리를 연계하지 않을 경우와 발전기 및 주 추진기관의 사용특성이 매우 유사하다.

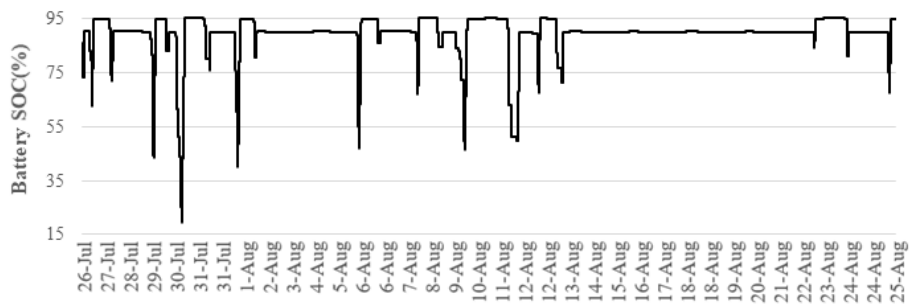


Fig. 5.22 Battery SOC

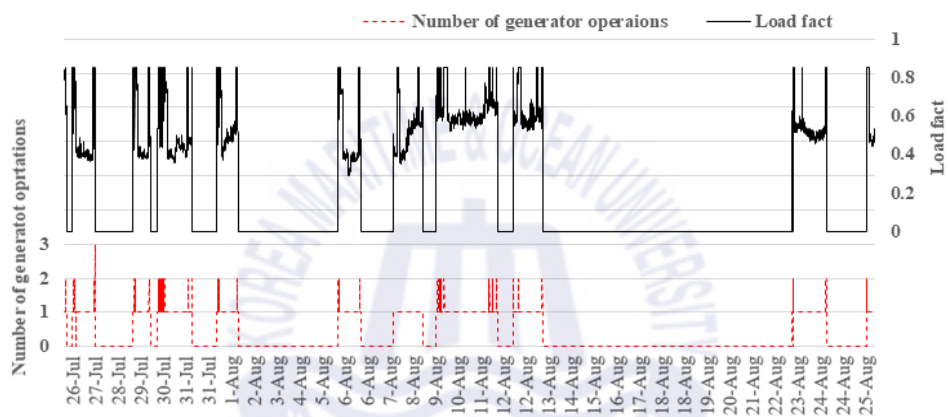


Fig. 5.23 Number of generator operations and load rate

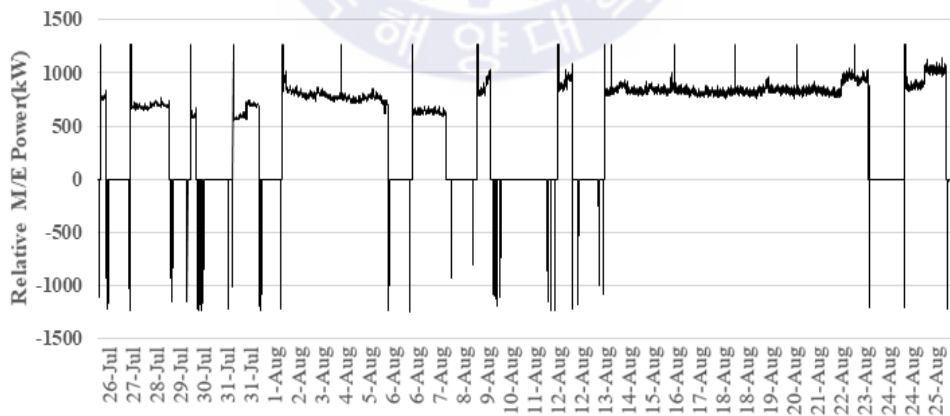


Fig. 5.24 Additional power of main engine

배터리 연계형 PTO & PTO mode 적용할 때 연료 소비량은 메인 엔진이 849,231kg, 발전기가 40,066kg으로 총 896,297kg을 소비한다. PTI mode에서 배터리를 이용하여 전력을 공급하여 입항 및 출항 때 발전기 운전 대수가 배터리를 사용하지 않은 경우에 비하여 현저히 줄어들 수 있다. 앞서 나타낸 것과 같이 입항 및 출항 중 주 추진기관의 필요 출력은 7,000kW로, 추진 전동기만으로는 안정적인 운항의 어려움을 뜻한다. 더불어 배터리만으로 선내 전력을 공급할 경우, 추진 전동기의 전력 소비량까지 감당해야 하므로 배터리의 용량이 매우 커져야 한다. 따라서 하이브리드 전기 추진 시스템에서 PTI mode의 사용은 지양하는 것이 좋다.

5.2 6,800 TEU 컨테이너선

6,800 TEU 컨테이너선은 2014년 11월 15일부터 2015년 3월 4일까지, 총 109일간의 데이터를 시뮬레이션 입력 값으로 사용하며, 주요 선박의 제원은 Table 4.1(pp.53)과 같다. 데이터 수집 간격은 10분으로 2,500 TEU 컨테이너 선박의 수집 간격인 5분 보다 2배 길지만, 수집 기간이 109일이므로 3배 이상의 수집 기간을 가진다. 따라서 보다 의미 있는 데이터로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

① User operation profile

총 109일간 운항한 6,800 TEU 컨테이너 선박의 운항 데이터는 다음과 같다.

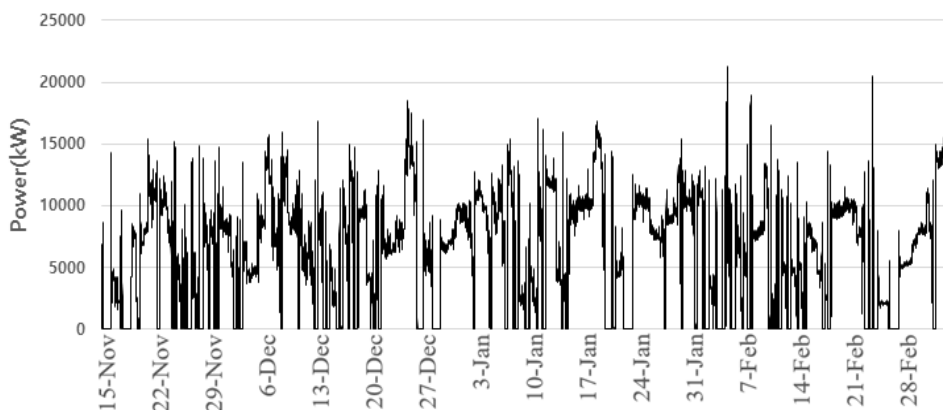


Fig. 5.25 Main engine power

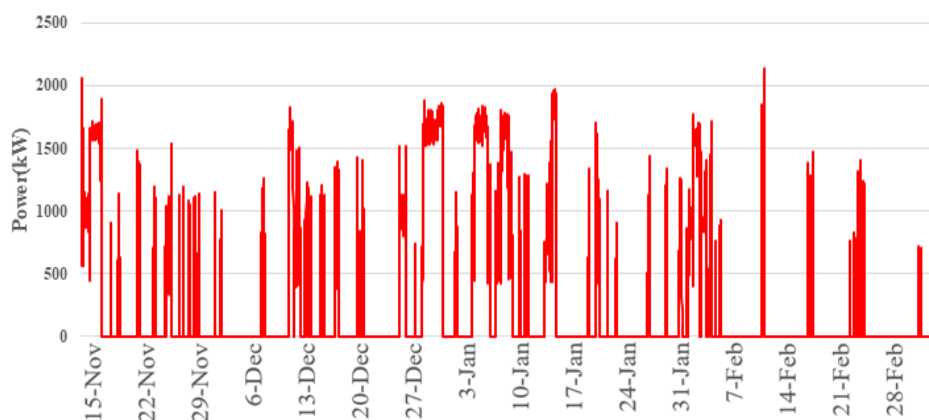


Fig. 5.26 No.1 generator power

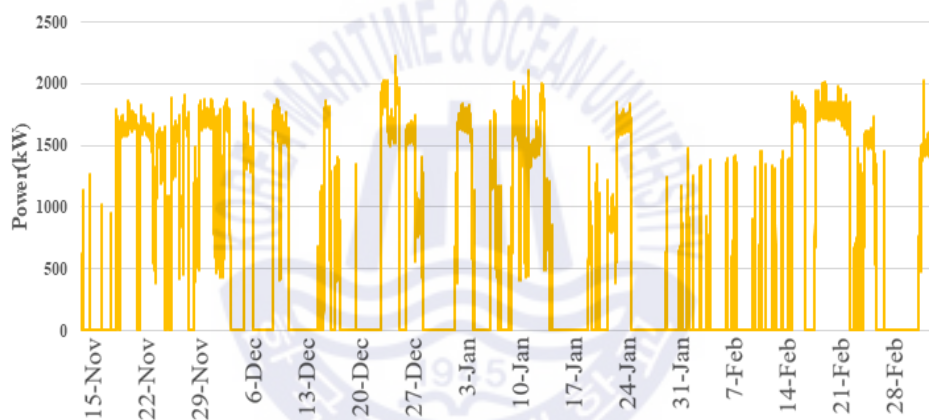


Fig. 5.27 No.2 generator power

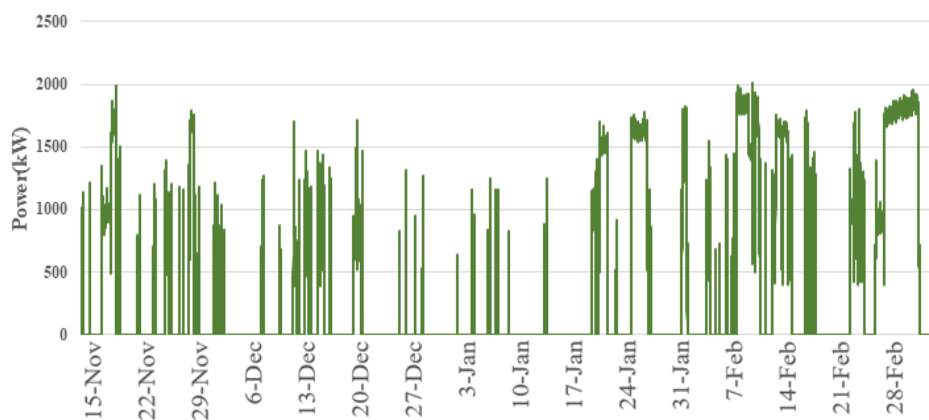


Fig. 5.28 No.3 generator power

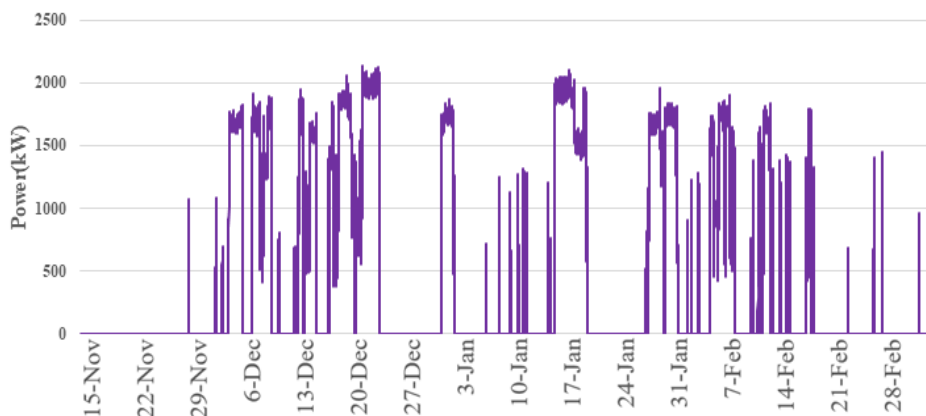


Fig. 5.29 No.4 generator power

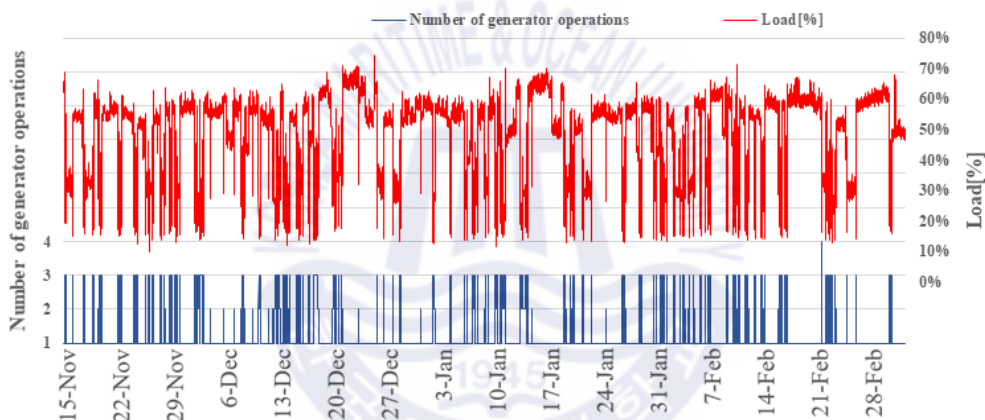


Fig. 5.30 Number of generator operations and load rate

Fig. 5.30는 6,800 TEU 컨테이너 선박의 운항 중 발전기 운용 대수 및 부하율을 나타낸다. 2,500 TEU 컨테이너 선박에 비하여 3대 이상의 발전기를 운용하는 경우가 많이 있으며, 발전기 평균 부하율이 46.45%로, 2,500 TEU 컨테이너 선박보다 현저히 낮은 부하율로 운영된다.

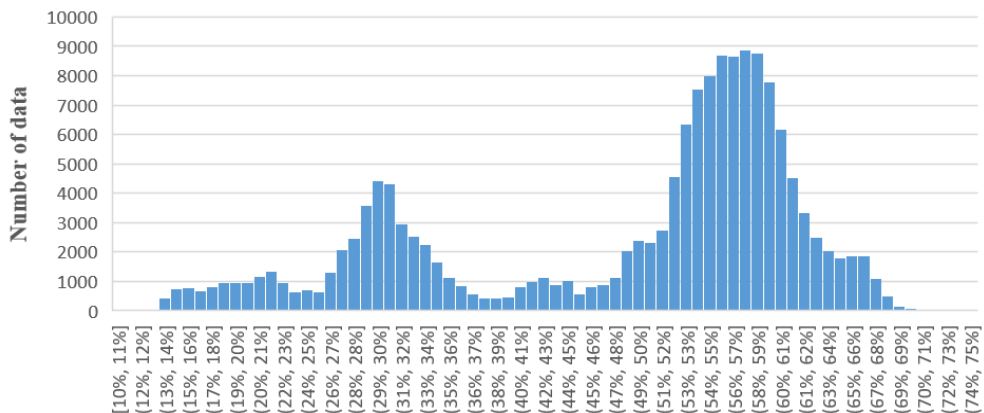


Fig. 5.31 Histogram of generator load rate

6,800 TEU 컨테이너 선박의 발전기 평균 부하율의 히스토그램을 보면, 52%~60% 구간에서 발전기가 가장 오랜 기간 운전됨을 확인할 수 있으며 2,500 TEU 컨테이너 선박에 비하여 30% 이하의 낮은 부하율에서도 많은 시간 운용됨을 확인할 수 있다. 주 추진기관 및 발전기의 연료 소비량을 2,500 TEU 컨테이너 선박과 동일한 조건으로 시뮬레이션을 진행하였을 때, 주 추진기관의 연소 소비량은 2,786,610kg, 발전기의 4대의 총 연료 소비량은 782,717kg으로 총 3,569,327kg의 연료를 소비한다.

이후 기계식 추진 시스템 및 전기식 추진 시스템의 시뮬레이션의 알고리즘은 2,500 TEU 컨테이너 선박과 동일한 조건으로 수행하되, 배터리의 용량 및 추진 전동기, 축 발전기의 용량에 차이를 갖도록 한다. 배터리의 용량 및 추진 전동기, 축 발전기의 용량 선정은 2,500 TEU와 같은 조건을 만족하는 범위에서 임의로 산정하여 시뮬레이션을 진행한다.

② 가변속 발전기 적용

가변속 발전기 탑재에 따라 발전기에서 생산되는 전력은 컨버터로 인한 손실분까지 고려하여 전력을 생산하여야 한다. 따라서 사용자 운항 프로파일 상에서 발전기의 생산 전력보다 다소 높은 전력 생산이 필요하다. 따라서 발전기의 부하량은 다소 증가하지만 발전기의 운전 대수 사용자 운항 프로파일과 동일하다. 이때 가변속 발전기 적용으로 저-부하에서 정속도 발전기에 비하여 에너지 효율을 높일 수 있다. 가변속 발전

기를 적용한 시뮬레이션 결과 [①User operation profile(pp.87)]과 동일한 운전 조건에서 발전기의 연료 소비량은 762,822kg으로 나타난다. 이는 정속도 발전기의 연료 소비량이 782,717kg인 것에 비하여 19,895kg을 절약할 수 있으며, 약 2.54% 이상의 에너지 효율 개선 효과를 가진다.

③ PMS_(FSG)

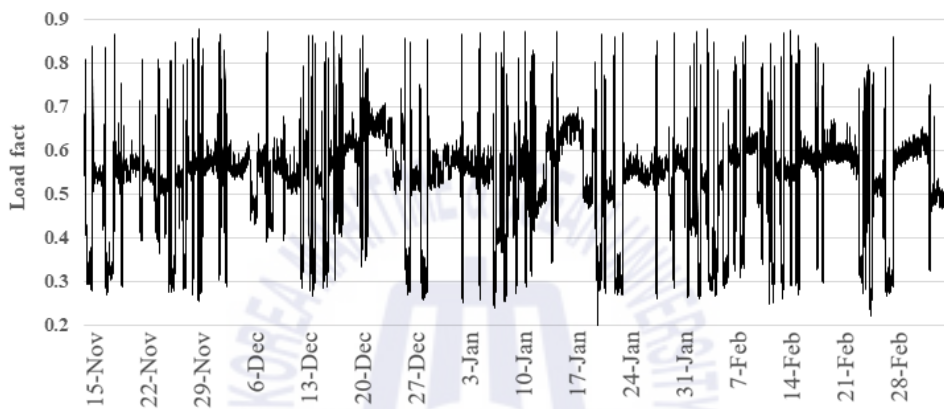


Fig. 5.32 Generator load rate of ideal PMS

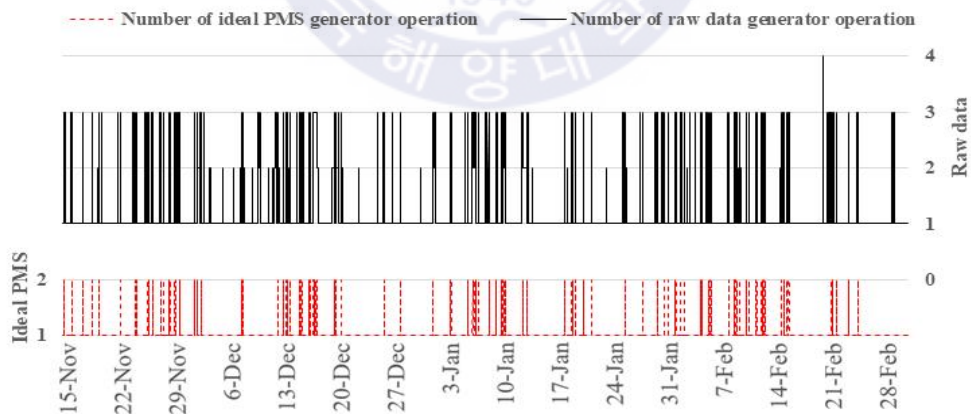


Fig. 5.33 Number of generator operations at ideal PMS

[①User operation profile(pp.88)]에서는 발전기 평균 부하율이 46.45%이었으나 이상적 전력 관리 시스템에서는 평균 부하율이 약 51.9%로, 약 5.45%의 평균 부하율이 높

아졌다. 이때 정속도 발전기를 탑재하면 발전기의 총 연료 소비량은 761,476kg이며, 가변속 발전기를 탑재하면 연료 소비량은 756,890kg으로 계산된다. 따라서 [①User operation profile]에 비하여 각각 약 2.71%, 3.3% 절약할 수 있다.

④ PMS_(B-VSG)

배터리 연계형 전력 관리 시스템은 배터리의 용량에 따라 에너지 효율에 다소 차이를 보일 수 있다. 본 논문에서는 2,500 TEU 컨테이너선과 동일한 조건을 갖도록 하며, 6,800 TEU 컨테이너선의 배터리 용량은 3,913kWh로 적용하였다. 배터리 연계형 전력 관리 시스템을 적용한 시뮬레이션의 경우 기존 [①사용자 운항 프로파일(pp.88)]에 비하여 발전기를 2대 이상 운용하는 횟수가 현저하게 줄어든 것을 확인할 수 있다. 평균 부하율은 52.23%로 보다 높은 에너지 효율을 가질 것으로 판단된다. 배터리를 연계한 전력 공급 시스템에서 발전기가 소비한 연료량은 756,525kg이다.

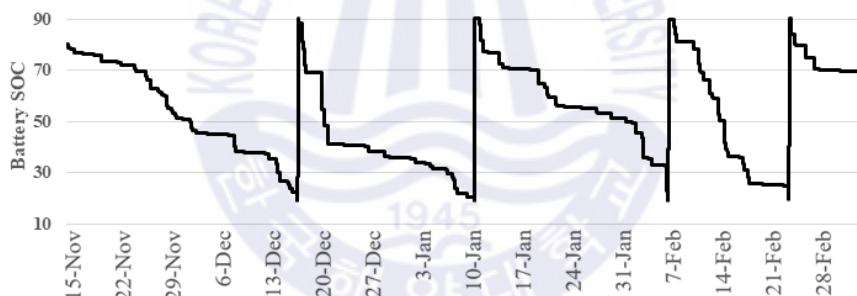


Fig. 5.34 Battery SOC

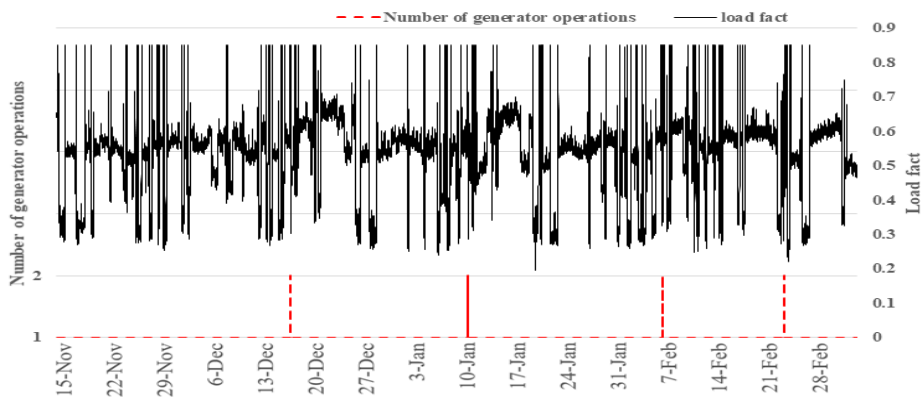


Fig. 5.35 Number of generator operations and load rate

⑤ PTO_(FGS) mode

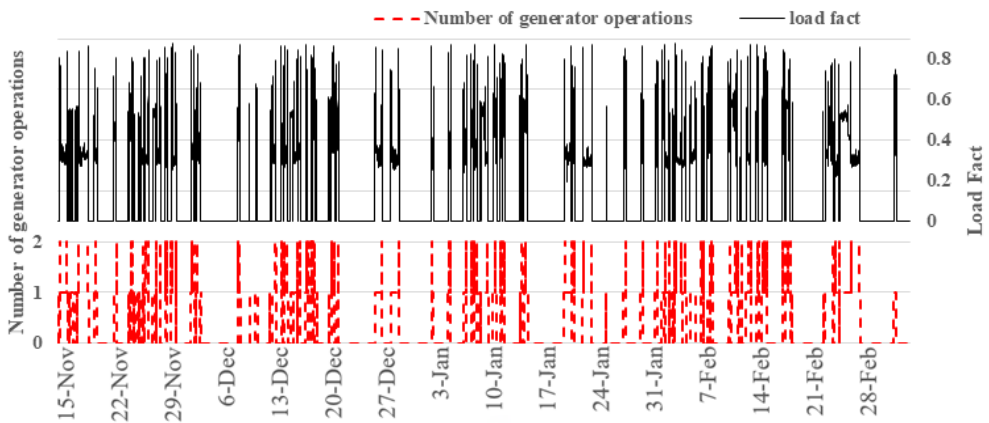


Fig. 5.36 Number of generator operations and load rate

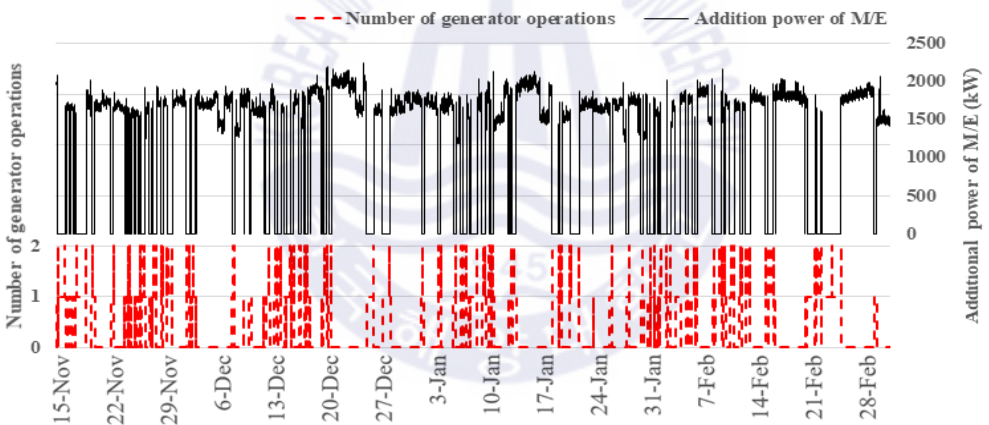


Fig. 5.37 Additional power of main engine and number of generator operations

PTO mode를 적용하면 선박 항해 주기 중 가장 긴 시간을 할애하는 항해 모드에서 발전기를 사용하지 않고 축 발전기만으로 선내 전력을 공급할 수 있다. 이때 발전기의 평균 부하율은 약 44.34%로 비교적 높지 못한 부하율로 운전되지만, 주 추진기관의 연비 특성이 발전기의 연비 특성보다 좋으므로 연료유 소비량을 줄일 수 있다. PTO mode에서 주 추진기관의 연료 소비량은 3,269,910kg이며 발전기의 연료 소비량은 205,951kg으로 총 3,475,861kg의 연료를 소비한다. 따라서 사용자 운항 프로파일에 비하여 약 2.61%의 연료를 절약할 수 있다.

⑥ PTO_(B-VSG) mode

앞서 진행하였던 PTO mode의 시뮬레이션 결과로 발전기의 평균 부하율이 42.1%로 계산된다. 이를 통하여 이상적 전력 관리 시스템의 발전기 평균 부하율인 52.23%보다 매우 낮은 부하율로 운전함을 확인하였다. 이러한 저-부하 운전 문제는 배터리를 적용함으로써 개선할 수 있다.



Fig. 5.38 Battery SOC

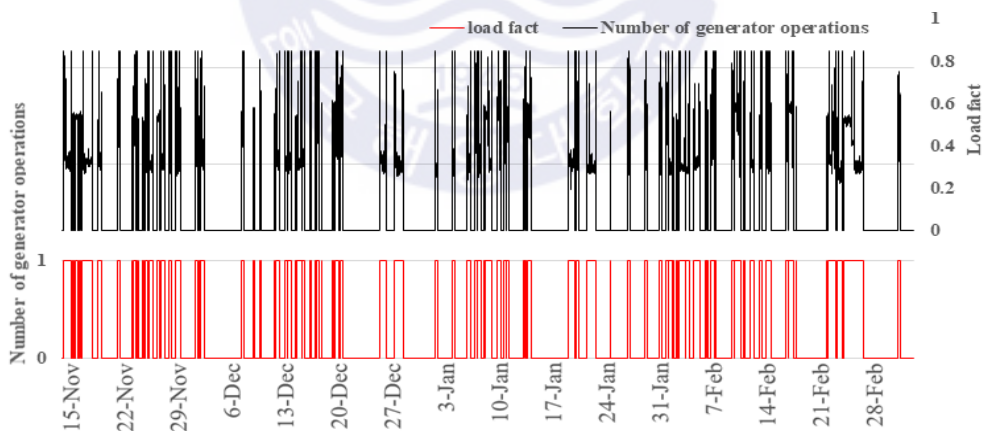


Fig. 5.39 Number of generator operations and load rate

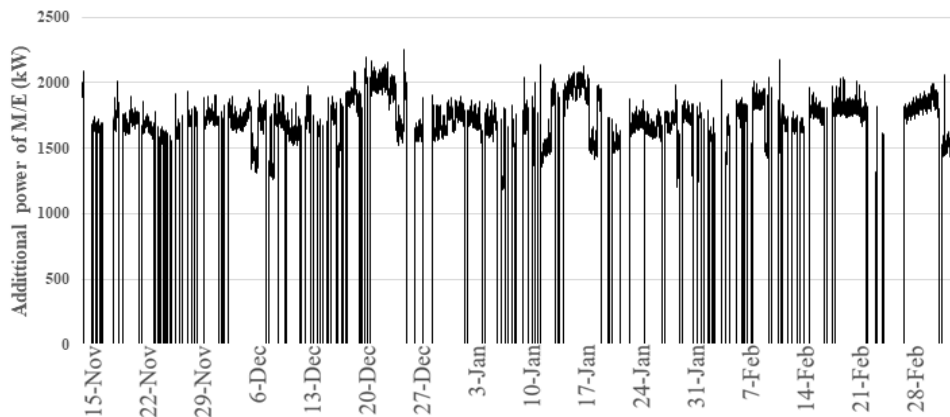


Fig. 5.40 Additional power of main engine

배터리 연계형 PTO mode의 경우 배터리 비 연계형에 비하여 발전기 운전 대수가 현저하게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 배터리 연계형 PTO mode는 2대 이상의 발전기를 운전하지 않으며, 전력 부하에 따라 적절한 발전기 운전 대수를 유지하기 위하여 비 연계형 PTO mode에 비하여 발전기 운전 대수가 빈번하게 조절된다. 이때 발전기의 평균 부하율은 43.84%로 배터리 비 연계형 PTO mode에 비하여 다소 높아진 부하율을 가지며, 주 추진기관의 연료 소비량은 3,270,010kg, 발전기의 연료 소비량은 208,430kg으로 총 3,478,440kg의 연료를 소비한다.

⑦ PTO&PTI_(FSG) mode

6,800 TEU 컨테이너 선박의 운항 데이터를 보면 입항 및 출항 중 주 추진기관의 출력은 최대 15,000kW 이상으로, 엔진 최대 출력 설계 사양의 약 22%를 필요로 한다. 그러나 이러한 출력을 낼 수 있는 추진 전동기를 탑재한다면 현재 운항되고 있는 선박의 발전체제시스템으로는 안정적인 전력 공급이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 2,500 TEU 컨테이너 선박과 동일하게 PTO mode에서 사용한 축 발전기 용량과 동일한 용량으로 추진 전동기를 적용하여 연료 소비량 산출을 위한 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션 결과, 주 추진기관의 연료 소비량은 3,255,680kg, 발전기의 연료 소비량은 221,674kg으로 총 3,477,354kg의 연료를 소비한다.

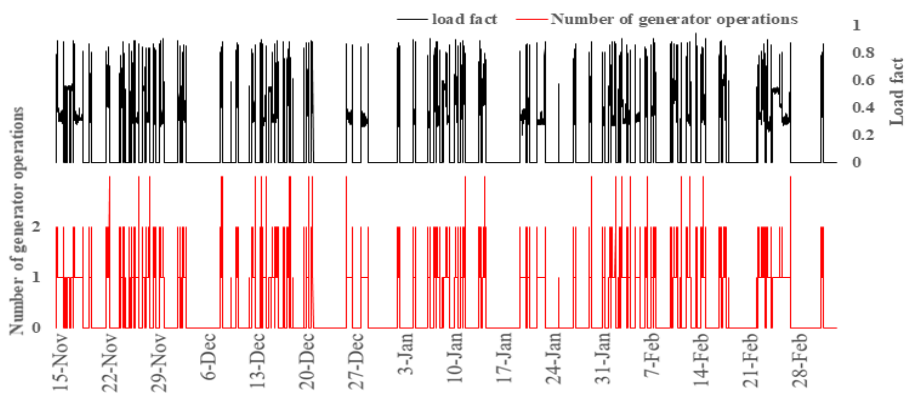


Fig. 5.41 Number of generator operations and load rate

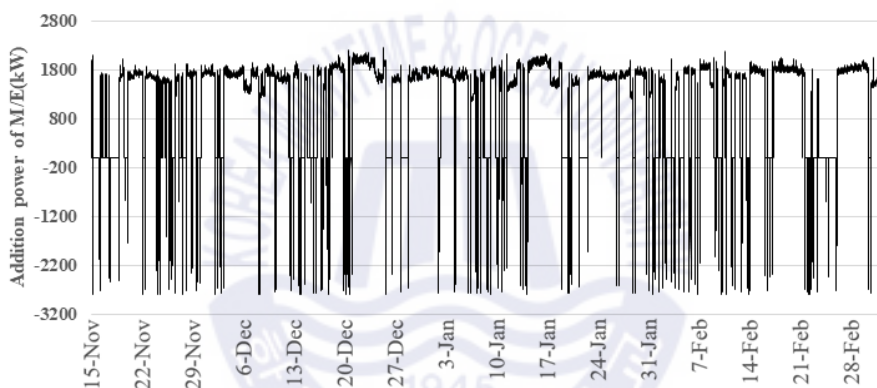


Fig. 5.42 Additional power of main engine

⑧ PTO & PTI mode(with ESS)

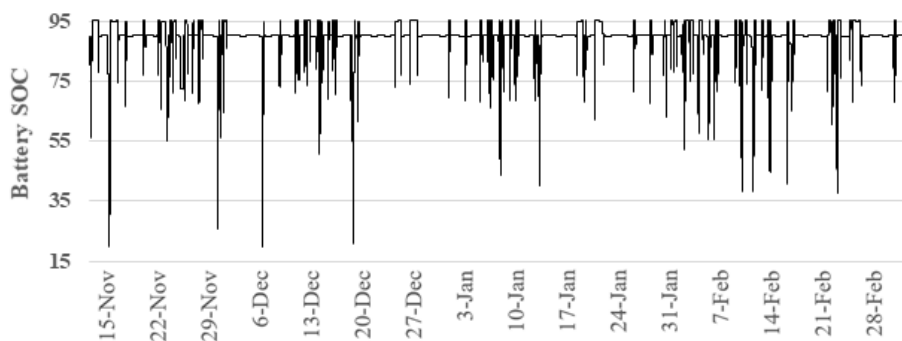


Fig. 5.43 Battery SOC



Fig. 5.44 Number of generator operations and load rate

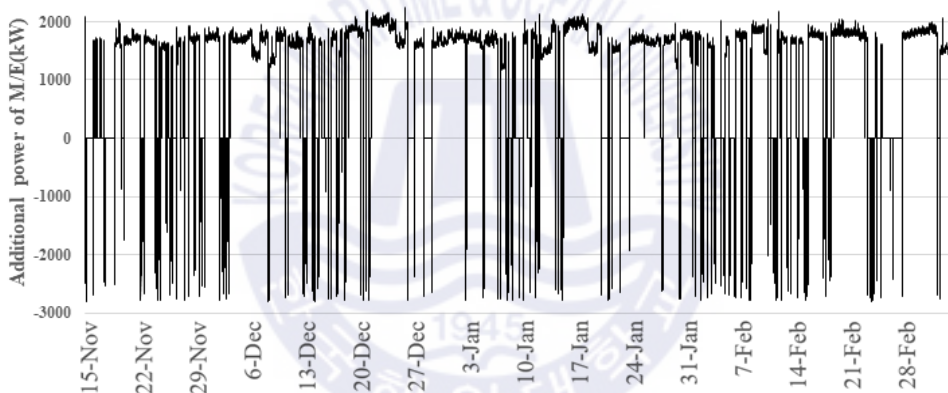


Fig. 5.45 Additional power of main engine

배터리 연계형 PTO & PTO mode의 연료 소비량은 주 추진기관에서 3,260,550kg, 발전기에서 246,205kg으로 총 3,506,755kg을 소비한다.

제 6 장 검토 및 고찰

제 6장에서는 5장의 시뮬레이션 결과를 정리 및 고찰한다. Table 6.1은 시뮬레이션에 적용한 2,500 TEU 및 6,800 TEU 컨테이너 가상 선박의 최종 제원을 나타낸다. 시뮬레이션은 각각의 선박 추진 및 전력 시스템의 변경에 따른 운용 알고리즘을 변화시켜가며 발전기의 운용 특성 및 에너지 효율성을 비교하였다. 시뮬레이션 결과, 기존 선박의 구성을 변경하였을 때 최대 약 2.7%의 연료유를 절감할 수 있는 것으로 확인되었다. Table 6.2 및 Table 6.3은 각각의 컨테이너 선박에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

Table 6.1 Specification of simulation target vessels

	2,500 TEU	6,800 TEU
Length overall	210 m	299 m
Extreme breadth	32 m	40 m
Dead weight ton	80,000 ton	32,600 ton
Main engine power	24,000 kW	68,250 kW
Generator power	1,450 kW X 4EA	3,000 kW X 4EA
Max. speed	20 knot	25 knot
Simulation time	32 days(1min)	109 days(1min)
Li-ion battery capacity	1,926.4 kWh	3,913 kWh
Charging max. C-rate	0.5 C	0.5 C
Discharging max. C-rate	1 C	1 C
Battery operating range	20 ~ 95%	20 ~ 95%

Table 6.2 Simulation results of 2,500 TEU container vessel

Case	Main engine FOC(kg)	Generator FOC(kg)	Total FOC(kg)	Total energy efficiency	Generator efficiency
1. User operation profile	789,119	112,892	902,011	100	100
2. Variable speed generator	789,119	110,955	900,074	100.22	101.75
3. Ideal PMS(fixed speed generator)	789,119	110,170	899,289	100.30	102.47
4. Ideal PMS(variable speed generator)	789,119	110,116	899,235	100.31	102.52
5. Battery linked PMS (fixed speed generator)	789,119	109,894	899,013	100.33	102.73
6. PTO mode(fixed speed generator, ESS)	850,255	39,618	889,873	101.36	-
7. PTO mode(variable speed generator)	850,337	38,234	888,571	101.51	-
8. PTO & PTI mode (fixed speed generator)	848,786	40,981	889,767	101.38	-
9. PTO & PTI mode (variable speed generator, ESS)	849,231	40,066	896,297	100.64	-

Table 6.3 Simulation results of 6,800 TEU container vessel

Case	Main engine FOC(kg)	Generator FOC(kg)	Total FOC(kg)	Total energy efficiency	Generator efficiency
1. User operation profile	2,786,610	782,717	3,569,327	100	100
2. Variable speed generator	2,786,610	762,822	3,549,432	100,56	102.61
3. Ideal PMS(fixed speed generator)	2,786,610	761,476	3,548,086	100,60	102.79
4. Ideal PMS(variable speed generator)	2,786,610	756,890	3,543,500	100,73	103.41
5. Battery linked PMS (fixed speed generator)	2,786,610	756,525	3,543,135	100,74	103.46
6. PTO mode(fixed speed generator, ESS)	3,270,010	208,430	3,478,440	102,61	-
7. PTO mode(variable speed generator)	3,269,910	205,951	3,475,861	102,69	-
8. PTO & PTI mode (fixed speed generator)	3,255,680	221,674	3,477,354	102,64	-
9. PTO & PTI mode (variable speed generator, ESS)	3,260,550	246,205	3,506,755	101,78	-

사용자 운항 프로파일 및 전력 관리 시스템에서 발전기가 소비한 연료유량의 차이는 약 2%로 확인되었다. 이를 통하여 선박에서 실제 운용자들이 운용하는 방법과 전력 관리 시스템의 자동 운전 알고리즘이 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 또한, 배터리를 적용하였을 때 정속도 및 가변속 발전기의 탑재 여부에 따라 다소 차이는 발생하나, 약 3% 정도의 에너지를 절약할 수 있음을 확인하였다.

제 5장의 시뮬레이션 결과를 보면 기존의 기계식 추진 시스템을 전기식 추진 시스템으로 구성을 변경함에 따라 발전기의 운용 대수는 현저하게 줄었으며, 발전기의 평균 부하율이 4% 이상 높아진 반면에 연료유 절약 비율은 약 2~3%로 나타났다. 이는 배터리의 충전 및 방전 효율을 93%로 가정하여 시뮬레이션을 수행함에 따라 불가피하게 7% 이상의 에너지 변환 손실이 발생하였고, 발전기 부하율 증가에 비하여 효율이 비교적 낮게 산출되었기 때문이다. 또한 배터리의 잦은 충전 및 방전을 방지하기 위하여 배터리 충전 및 방전 제어 알고리즘에 히스테리시스 제어를 적용함으로써 배터리 운용에 제한을 두었던 것도 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 이러한 문제점은 추후 배터리 기술의 발달로 에너지 변환 효율이 높아지거나, 연료유 가격의 지속적인 상승으로 투자비 회수(payback) 기간이 충분히 짧아진다면 탑재를 적극 고려할 수 있다.

PTO mode에 적용한 배터리의 용량을 배터리 연계형 전력 관리 시스템의 배터리 용량과 동일하게 하였을 때, 배터리의 SOC가 변화하는 사용구간은 약 30% 정도로 배터리 용량에 비하여 사용하는 구간이 매우 작다. 따라서 PTO mode를 적용할 때는 배터리 연계형 전력 관리 시스템에 탑재되는 배터리보다 작은 용량의 배터리를 탑재하여도 에너지 효율은 크게 달라지지 않으므로 작은 용량의 배터리를 탑재하여도 에너지 효율 향상 효과를 기대할 수 있다.

PTO & PTI mode에서 추진 전동기의 사용은 선박이 입항 또는 출항할 때만 사용할 수 있으며, 이를 온전하게 사용하기 위해서는 메인 엔진의 최대 출력의 20%~30% 정도의 비교적 큰 용량의 추진 전동기가 탑재되어야 한다. 이러한 추진 전동기의 탑재는 추진 기관의 다중화로 안정성 및 신뢰성을 높일 수 있으나, 해군 함정과 달리 경제적 이익을 우선으로 하는 상업용 선박에는 적합하지 않을 것으로 판단된다. 현재 운항되고 있는 선박의 개조를 통하여 PTI mode를 적용할 경우 기존의 전력체계로는 운항이 어렵기 때문에, 향후 신조되는 선박에 탑재를 고려해야 한다. 신조선박에 PTI mode를 적용하여 운용할 경우 PTI mode를 적용함에 따른 이점을 가질 수 있도록 발전기 용량 및 탑재 대수, 추진 전동기와 주 추진기관의 용량 등이 고려되어 설계되어야 한다.

제 7 장 결론

본 논문에서는 배터리 및 전기 추진 시스템이 탑재된 선박을 위한 통합 기관 제어기반 운용 알고리즘을 제안하고, 시뮬레이션을 통하여 선박 에너지 효율을 비교하였다. 에너지 효율성을 비교하기 위하여 NI사의 LabVIEW를 활용하여 선박 선속-출력 모델, 메인 엔진 연비특성 모델, 발전기 연료특성 모델, 추진 전동기 효율 모델, 축 발전기 모델 및 배터리 효율 모델을 설계하였다. 모델의 설계는 선박에서 측정한 데이터 및 제조사에서 제공하는 장비 사양 및 관련 참조문헌을 이용하였다.

선박 시스템의 구성변화에 따른 에너지 효율을 비교하기 위하여 실제 컨테이너 선박의 운항 데이터를 활용하였다. 그리고 시뮬레이션을 진행함으로써 추진 시스템 및 전력 시스템의 변화에 따른 에너지 효율을 비교 및 고찰하였다. 이와 관련하여 본 논문에서 수행한 연구를 정리하면 다음과 같다.

- 전기식 추진 시스템의 구성에 따른 발전기 및 축 전동기(축 발전기, 추진 전동기)의 통합 기관 제어기반의 운용 알고리즘을 제안하였다.
- 추진 시스템 및 발전 시스템의 에너지 효율에 영향을 미치는 주요 장비에 대하여 subVI로 모델을 구성하여 선박의 추진 및 전력 시스템 구성에 따라 간편하게 재구성하여 활용할 수 있도록 프로그램을 구현하였다.
- 선박의 전력 시스템에 에너지 저장 장치인 배터리를 적용함으로써 발전기의 운전 평균 부하율을 높여 발전기의 높은 연비 특성 구간에서 운용할 수 있도록 하였다. 이를 통하여 연료를 절약할 수 있다. 또한, 원동기-발전기로만 구성된 전력 시스템에 비하여 전력 안정성을 높여 보다 강인하게 운용할 수 있다.
- PTO mode를 적용할 때 배터리를 연계한 구성이 배터리 비 연계 구성보다 효율이 높아지나, 배터리 연계형 전력 관리 시스템에 탑재되는 배터리 용량보다 충분히 작게 하여도 효율에 큰 영향을 미치지 않았다. 이에 따라 PTO mode를 적용할 때 투자비 회수 기간을 고려하여 탑재할 배터리의 용량을 고려할 필요가 있다.
- PTI mode의 적용을 위한 추진 전동기의 용량은 주 추진기관 최대출력의 20~30% 정도가 적당한 것으로 판단되나, 추진 전동기의 안정적인 구동을 위한 발전기 및 배터리의 용량이 커지게 되므로 상선에서 PTI mode의 적용은 경제성이 다소 떨어진다.

본 연구를 통하여 추진 및 전력 시스템 변경에 따른 이점을 확인할 수 있었다. 그러나 실제 선박에 이러한 추진 및 전력 시스템의 적용을 위하여 신뢰성에 대한 문제 해결이 필요하다. 따라서 본 연구 이후 배터리 및 PTO&PTI mode 적용에 따른 과도상태 해석에 관한 연구가 추가적으로 필요하다. 이를 통하여 추진 장비의 절환 시간 등에 따라 전력 조류 해석 등을 통한 안정성을 확보하여야 한다. 또한, 대형 상선에 PTI mode의 적용은 추가적인 장비를 탑재하였음에도 에너지 효율 향상이 미비하였다. 따라서 상업용 선박에 PTI mode의 적용보다는 IPS 추진 시스템을 적용하면 더 많은 이점을 더 가질 것으로 판단된다. 이러한 IPS 추진 시스템의 경우 다수의 발전기기를 탑재하여 운항하므로 발전기 용량 선정에 따라 에너지 효율에 차이가 발생하므로 탑재되는 장비의 용량 설계가 중요하다.



감사의 글

먼저 지금까지 사랑과 은혜로 베풀어 주신 하나님 은혜에 감사드립니다.

2009년 3월 연구생으로 실험실 생활을 시작하여 어느덧 12년이라는 시간이 흘렀습니다. 12년이라는 시간을 돌아보니 제가 지금까지 걸어온 길은 저 혼자 힘으로 헤쳐 나아갈 수 없는 것을 주변 분들의 많은 도움과 관심으로 올 수 있었음을 다시 한번 느끼며 이 글을 빌려 감사의 마음을 전하고자 합니다.

12년이라는 기간 동안 학문의 가르침뿐만 아니라 인생의 선배이자 스승으로 항상 아낌없는 애정과 관심으로 지도해주신 오진석 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 올립니다. 가르쳐주신 모든 것 가슴에 품고 살아갈 수 있도록 하겠습니다. 항상 건강하시고 내일이 오늘보다 더 행복하시길 바랍니다.

매학기 유익한 가르침을 주시고 다양한 분야로의 시야를 넓혀주신 소명옥 교수님, 학문뿐만 아니라 세상을 살아가는 자세를 보여주신 윤희한 교수님, 부드러운 말씀 속에 피와 살이 되는 조언을 해주시고 긍정의 자세를 가르쳐주신 오세준 교수님, 위로와 격려의 말과 함께 조언을 해주신 정성영 박사님께 부족한 논문을 심사하여 주심에 깊이 감사드립니다. 많이 안다고 생각했지만 하나를 더 배우고 알아갈수록 저의 부족함을 많이 느꼈습니다. 이러한 부족함을 알기에 앞으로 더 나아갈 수 있다고 믿고 부족함을 채워가며 한 걸음 더 나아가려고 합니다. 다시 한번 감사드립니다.

학교가 전부였던 저의 작은 우물 같던 세상에 새로운 넓은 세상으로 나아가는 문을 열어주신 양향권 대표님, 함연재 대표님, 백공구 소장님, 류승현 사무관님, 최동일 부장님, 박태진 중령님, 심재순 수석님, 추진훈 책임님, 류동영 상무님, 최기원 대표님, 홍성민 대표님, 이창노 팀장님, 하충호 부장님, 김종우 부장님께 감사드립니다.

제가 학위를 마칠 수 있었던 것은 실험실을 지켜낸 많은 선배와 후배님들이 계셨기에 가능하였습니다. 함께 실험실 생활을 하며 오랜 기간 동고동락하며 논문 오타자를 봐준 김민욱, 큰 덩치와 다르게 세심하게 옆에서 많은 일을 도와주는 이종학, 때로는 진지한 선배로 때로는 친근한 친구처럼 함께 기뻐하고 슬피하였던 김지윤희, 동네 주민이 되어 따듯한 커피 한잔을 나눌 수 있었던 곽준호형에게 감사드립니다. 또한, 지금까지 연구실이 유지되고 지금의 제가 있게 한 박재현형, 이지영누나, 조관준형, 김연형형, 한성훈형, 박도영형, 배수영누나, 강훈, 강영민, 장재희, 손나영에게 감사드립니다.

대학원 생활을 평계로 잘 만나지도 못하는 저를 친구로 지금까지 행복을 빌어주는 친구 기훈, 수형, 용희, 하식형, 근호형에게 감사드립니다. 제가 성인이 된 후 대부분의 제 인생은 실험실에 있었습니다. 실험실에서 배운 그 모든 것 하나하나가 저에게 소중한 그 무엇보다도 옆에 있어주신 분들이 저에게 최고의 재산이자 선물입니다. 지금까지 주변에 항상 좋은 분들이 제 옆을 지켜주셨습니다. 제가 다른 건 없어도 인복은 타고났나봅니다. 일일이 언급을 못한 분들에게도 감사드립니다.

마지막으로 아낌없는 사랑과 지원으로 늘 뒤에서 응원해주신 부모님과 힘들대 말없이 손 내밀어 주는 가영누나와 구슬매형, 항상 모범이 되는 구현누나, 순성매형에게 감사의 말씀 전합니다. 가족이 있었기에 힘든 일 이겨낼 수 있었습니다. 부모님과 가족 모두에게 보고 배운 대로, 정직하고 부끄럽지 않게 살아가도록 하겠습니다.



참고문헌

- [1] 박유상, “해상환경규제 강화에 따른 조선산업 영향”, 이슈브리프, 2018.
- [2] 이성근, 배재류, 김진강, “선박 추진시스템 기술동향과 기술개발전략”, 대한조선학회지, 52(2), pp.13-18
- [3] Jin-Seok Oh, Hunseok Lee, “A study on appropriate ship power system for pulse load combine with secondary battery”, The Korean Society of Marin Engineering, 37(8), pp.962-968
- [4] Jin-Seok Oh, Young-Min Kang, Hunseok Lee, “Energy consumption reduction by battery-connected power management systems of ships under various operating modes”, The Korean Society of Marin Engineering, 41(5), 445-451
- [5] Hunseok Lee, Jin-Seok Oh, “Comparison of energy efficiency of container ships with variable speed generation system”, The Korean Society of Marin Engineering, 43(7), pp.569-574
- [6] 장재희, “LCS에 의한 전기추진장치용 하이브리드 전력원의 에너지관리 연구”, 한국해양대학교 박사 학위 논문, 2019
- [7] Dong-Il Choi, Hunseok Lee, Jin-Seok Oh, “Analysis of annual fuel consumption by using bidirectional power conversion with hybrid electric propulsion system in naval ship”, The Korean Society of Marin Engineering, 43(4), pp.299-306
- [8] 한국수출은행, 2012, 그린쉽(Green-Ship; 고연비·친환경 선박), 조선산업의 새로운 도전과 기회, 한국수출입은행 해외경제연구소
- [9] Lu Zhen, Miao Li, Zhuang Hu, Wenya Lv, Xiao Zhao, “The effects of emission control area regulation on cruise shipping”, Transportation Research Part D 62, pp.47-63
- [10] K. Fagerholt, N.T. Gausel, J.G. Rakke, H.N. Psaraftis, “Maritime routing and speed optimization with emission control areas”, Transportation Research Part C 52, pp.57-73

- [11] Christopher R. German, Micheal V. Jakuba, James C. Kinsey, Jim Partan, Stefano Suman, Abhimanyu Belani, Dana R. Yoerger, “A long term vision for long-range ship-free deep ocean operations: Persistent presence through coordination of Autonomous Surface Vehicles and Autonomous Underwater Vehicles”, 2012 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Conferences, pp.25
- [12] Christoph AlexanderThieme, Ingrid Bouwer Utne, Stein Haugenb, “Assessing ship risk model applicability to Marine Autonomous Surface Ships”, Ocean Engineering 165, pp. 140-154
- [13] 구대현, “전기추진선박 기술동향”, 대한전기학회, 전기의세계 58(5), pp. 36-43,
- [14] 홍지태, 강규홍, 배정철, “전기추진선박 연구 및 시험인증평가 인프라 구축”, 대한조선학회, 대한조선학회지 49(2), 60-65
- [15] So-Yeon Kim, “A Study on the adoption of power take off operation mode and fuel-saving effect in the hybrid electric propulsion system for a warship”, The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics 24(1), pp. 40-48
- [16] Dong-Il Choil, Hunseok Lee, Jin-Seok Oh, “Analysis of annual fuel consumption by using bidirectional power conversion with hybrid electric propulsion system in naval ship”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering 43(4), pp.299-306
- [17] Hyung-Min Lee, Byung-Jin Cho, “Analysis of development trend for the integrated power system of naval vessels to perform the high-power and energy mission load platform”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering 35(6), pp.796-801
- [18] Qunying Shen, B. Ramachandran, S. K. Srivastava, M. Andrus, D. A. Cartes, “Power and energy management in integrated power system,” Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), pp.414-419
- [19] 김소연, 설승기, “수상함 전기추진 기술 및 연구 동향”, 전력전자학회지 23(4), pp.38-43
- [20] Young-kWang Son, Seong-Yong Lee, Seung-Ki Sul, “Demonstration of DC electric propulsion system for 10-ton class fishing boat”, Power Electronics

Conference, pp.110-111

- [21] 김수남, 박영호, “DC 전기추진선 기술동향. 전기의세계 67(6)”, pp.25-31
- [22] 강규홍, 김성동. “전기추진선박 기술동향 및 선박에 따른 소비전력 분석”, The Korean Institute of Electrical Engineers 66(7), pp.13-20
- [23] 국방기술품질원, 2010. 국방과학기술조사서
- [24] 김정도, 정균식, 이지웅, 송영환, 정찬호, 최재성, “선박용 디젤발전기의 저부하 운전에 관하여”, 2010년도 한국마린엔지니어링학회 공동학술대회 논문집, pp.189-190
- [25] MAN Diesel & Turbo, “Low load operation”, SL11-544/MTS
- [26] Michael Lundh, Winston Garcia-Gabin, Kalevi Tervo, Rickard Lindkvist, “Estimation and optimization of vessel fuel consumption”, 10th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems. pp.394-399
- [27] Michel R. Miyazaki, Asgeir J. Sorensen, Bjorn J. Vartdal, “Reduction of fuel consumption on hybrid marine power plants by Strategic loading with energy storage devices”, IEEE Power and Energy Technology Systems Journal 3(4), pp.207-217
- [28] Athanasios G. Sarigiannidis, Efstratios Chatzinikolaou, Charalampos Patsios, Antonios G. Kladas, “Shaft generator system design and ship operation improvement involving sfoc minimization, electric grid conditioning, and auxiliary propulsion”, IEEE Transactions on Transportation Electrification 2(4), pp.558-569
- [29] MAN Energy Solutions, “Batteries on board ocean-going vessels”, 5510-0236-00ppr
- [30] MAN Diesel & Turbo, “Hybrid propulsion flexibility and maximum efficiency optimally combined”, D2366497EN-N1
- [31] IEEE Recommended Practice For Electrical Installations On Shipboard, 10.1109/IEEESTD.
- [32] N. H. Doerry and J. V. Amy, “Implementing quality of service in shipboard power system design“, IEEE Electric Ship Technologies Symposium(ESTS)
- [33] 이현석, “에너지 저장장치를 이용한 선박 에너지 효율 개선에 관한 연구”, 한국

해양대학교 석사 학위 논문, 2013

- [34] 김민욱, “ 군수지원함의 추진체계별 연료 소비량에 관한 연구 ”, 한국해양대학교 석사 학위 논문, 2016
- [35] 손나영, “HILS를 이용한 추진체계 검증 시뮬레이터 개발”, 한국해양대학교 석사 학위 논문, 2017
- [36] So-Yoen Kim, “A study on the adoption of power take off operation mode and fuel-saving effect in the hybrid electric propulsion system for a warship”, The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics 24(1), pp.40-48
- [40] 홍용표, “ 군함의 효율적인 동력 시스템 구성에 관한 연구 ”. 한국해양대학교 석사 학위 논문, 2015
- [41] Seung-hyun Ryu, Sung-young Jung, Jin-seok Oh, “A study of the hybrid electric drive generating mode in naval ships”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering 39(9), pp.967-972
- [42] H. Yoo, B.-G. Cho, S.-K. Sul, S.-M. Kim, and Y. Park, “A power flow control strategy for optimal fuel efficiency of a variable speed engine-generator based series hybrid electric vehicle”, in Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE), pp.443-450
- [43] P. Prempraneerach, S. Brizzolara, G. E. Karniadakis, C. Chrysostomidis, “Integrated simulation framework for crash back operation“, Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), pp. 185-191
- [44] J.W. Hur, H. Lee, B.J. Chang, “Propeller loads of large commercial vessels at crash stop“, Second International Symposium on Marine Propulsors (SMP11)
- [45] M. M. Marden, P. Prempraneerach, G.E. Karniadakis, C. Chrysostomidis, “An end-to-end simulator for the all-electric ship mvdc integrated power system”, Summer Simulation Multiconference (SummerSim)
- [46] M. Masum, S. Khan, S. Member, O. Faruque, and S. Member, “System for MVDC power system of all electric ship”, IEEE Trans. on Energy Conversion 32(2), pp.798-809

- [47] E. Sarris, “Naval ship propulsion and electric power systems selection for optimal fuel consumption” , M. S., Massachusetts Institute of Technology
- [48] MAN Diesel & Turbo, Basic Principles of Ship Propulsion
- [49] Hunseok Lee, Jin-Seok Oh, “Comparison of energy efficiency of container ships with variable speed generation system” , Journal of the Korean Society of Marine Engineering 43(7), pp.569-574
- [50] J.-H. Lee, S.-H. Lee, and S.-K. Sul, “Variable-speed engine generator with supercapacitor: Isolated power generation system and fuel efficiency” , IEEE Trans. on Ind. Appl.45(6), pp.2130-2135
- [51] British Crown, 2009. Electric Propulsion for UK Warships
- [52] GE Conversion, 2012, Type 23 Frigates Duke class, Case Study.
- [53] GE Conversion, 2012, Queen elizabeth class(QEC) aircraft carrier, Case Study.
- [54] Hyung-Min Lee, Byung-Jin Cho, “Analysis of development trend for the integrated power system of naval vessels to perform the high-power and energy mission load platform” , Journal of the Korean Society of Marine Engineering 35(6), pp.796-801
- [55] 최세화, “DC 계통에 기반한 전기 추진선의 과도 부하 응답 개선을 위한 제어기 설계” , 서울대학교 박사 학위 논문, 2018
- [56] V. Salehi, B. Mirafzal, and O. Mohammed, “Pulse-load effects on ship power system stability” , IECON Proc. pp.3353-3358
- [57] A. L. Gattozzi et al., “Power system and energy storage models for laser integration on naval platforms” , 2015 IEEE Electr. Sh. Technol. Symp.(ESTS), pp.173-180
- [58] T. Ma, M. H. Cintuglu, S. Members, and O. Mohammed, “Control of hybrid ac/dc microgrid involving energy storage , renewable energy and pulsed loads” IEEE Trans. on Ind. Appl. PP(99), pp.1-8
- [59] A. T. Elsayed, T. A. Youssef, and O. A. Mohammed, “Modeling and control of a

- low-speed flywheel driving system for pulsed-load mitigation in dc distribution networks” , IEEE Trans. on Ind. Appl., 52(4), pp.3378–3387
- [60] G. Sulligoi, a. Tessorolo, V. Benucci, M. Baret, a. Rebora, and a. Taffone, “Modeling, simulation, and experimental validation of a generation system for medium-voltage dc integrated power systems” , IEEE Trans. on Ind. Appl., 46(4), pp.1304–1310
- [61] Z. Jin, G. Sulligoi, R. Cuzner, L. Meng, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, “Next-generation shipboard DC power system: introduction smart grid and dc microgrid technologies into maritime electrical networks,” in IEEE Electrification Magazine 4(2), pp.45–57
- [62] Y. I. An, “Fishing efficiency of high capacity (360W) LED fishing lamp for squid *todarodes pacificus*” , Journal of the Korean Society of Fisheries Technology 50(3), pp.326–33
- [63] M. Altosole & M. Figari, “Effective simple methods for numerical modelling of marine engines in ship propulsion control system design” , Journal of Naval Architecture and Marine Engineering 2, pp.129–147
- [64] M Altosole, G Benvenuto, M Figari & U Campora, “Real-time simulation of a COGAG naval ship propulsion system” , Journal of Engineering for the Maritime Environment 223, pp.47–61
- [65] G. Benvenuto, S. Brizzolara & M. Figari, “Simulation of the propulsion system behaviour during ship standard manoeuvres” , Eighth International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures 16–21, Vol 1, pp.657–653
- [66] H. Alfares and M. Nazeeruddin, “Electric load forecasting: literature survey and classification of methods” , International Journal of Systems Science, pp. 23–34
- [67] B. Oh, B. Choi, Y. Choi, and S. Kim, “Development of machine learning based short-term load forecasting algorithm” , In Proceedings of the KIEE Workshop, pp. 86–87
- [68] B. Oh and S. Kim, “Development of svr based short-term load forecasting

- algorithm” , Trans. P of the KIEE, pp.95-99
- [69] J. Son, H. Lee, and H. Ahn, “RNN-based Deep learning model for electricity load prediction” , In Proceedings of ICROS, pp. 444-445
- [70] K. Kim, S. Jo, R. Park, and K. Song, “The trend of electric load forecasting using artificial intelligent” , in Proceedings of the KIEE Conference, pp. 457-458
- [71] T. Chen and C. Guestrin, “XGBoost: A Scalable tree boosting system,” KDD
- [72] Jae-Young Oh, Do-Hyeon Ham, Yong-Geon Lee, Gibak Kim, “Short-term load forecasting using xgboost and the analysis of hyperparameters” , The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers No.68(9), pp.1073-1078
- [73] K. S. Choi, K. H. Kim, K. Y. Kong, S. J. Park, S. I. Lee, “Case study on the optimal setting of dnn’s learning-rate for the forming control of the thick-plate of ship-block” , The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers Conference 2918, pp.158
- [74] Kyunghak Cho, Byoung-young Lee, Myeongheum kWon, Seogcheol Kim, “Air quality prediction using a deep neural network model” , Journal of Korean Society for Atmospheric Environment No. 35(2), pp.214-225
- [75] Bum-Jun Kim, Hyeonggi Moon, Sung-Wook Park, Youngho Jeong, Young-Cheol Park, “Time-domain sound event detection algorithm using deep neural network” , Journal of Broadcast Engineering No.24(3), pp.472-484
- [76] 조권희, 2016. 해기사를 위한 造船工學
- [77] 이수용, 2008. 造船工學概論
- [78] MAN Diesel & Turbo, “Marine engine IMO Tier II and Tier III programme 2018” , 4510-0017-00ppr
- [79] MAN, “Diesel-electric propulsion plants-a brief guideline how to engineer a diesel-electric propulsion system”
- [80] Alf Kare Adnanes, “Maritime electrical installations and diesel electric propulsion” , ABB AS Marine

- [81] Steve Bistak, Sun Y. Kim, “AC induction motors vs. Permanent magnet synchronous motors” , <https://empoweringpumps.com/ac-induction-motors-versus-permanent-magnet-synchronous-motors-fuji/>
- [82] Murphy, J., “Understanding AC induction, permanent magnet and servo motor technologies” , Leeson Electric Corp.
- [83] Murphy, Jim. “Sizing and selecting permanent AC motors” , Leeson Electric Corp.
- [84] Lin, P., and A. Crapo, “MDM webinar: Introduction to permanent magnet ac motors” . Webinar
- [85] Motor challenge, “Determining electric motor load and efficiency” ,DOE/GO-10097-517
- [86] Miralem HADŽISELIMOVIĆ, Ivan ZAGRADIŠNIK, Bojan ŠTUMBERGER, “Induction machine: Comparison of motor and generator characteristics” , Przegląd Elektrotechniczny No.89(R), pp.103-106
- [87] Sehwa Choe, Young-kWang Son, Seung-Ki Sul, “Ship dc microgrid with variable speed genset” , The Korean Institute of Power Electronics Conference. pp.233-234
- [88] Jin-seok Oh, Young-Min Kang, “Energy savings in ship power systems by using batteries” , Journal of the Korean Society of Marine Engineering 41(6), pp.576-582
- [89] Eleftherios K. Dedes, Dominic A. Hudson, Stephen R. Turnock, “Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaustemissions from global shipping” , ELSEVIER Energy poilcy 40, pp.204-218
- [90] A. Sarigiannidis, A. Kladas, E. Chatzinikolaou, C. Patsios, “High efficiency shaft generator drive system design for ro-ro trailer-passenger ship application” ,IEEE 978-1-4799-7400-9/15
- [91] Eleftherios K. DedesDominic A. HudsonStephen R. Turnock, “INvestigation of diesel hybrid systems for fuel oil reduction in slowspeed ocean going ships” , ELSEVIER Energy 114, pp444-456
- [92] Rene Prenc, “Advantages of using a DC power system on board ship” , Journal

of Maritime and Transportation Sciences 621(311), pp.83-97

- [93] B. Zahedi, “Shipboard DC hybrid power systems: Modeling, efficiency analysis and stability control” , Ph. D, NTNU
- [94] J. M. Guerrero, J. C. Vázquez, and R. Teodorescu, “Hierarchical control of droopcontrolled DC and AC microgrids—A general approach towards standardization” , IEEE Trans on Industrial Electronics 58(1), pp.158-172
- [95] Ho-Sung Kim, Myung-Hyo Ryu, Ju-Won Baek, Jee-Hoon Jung, “High-efficiency isolated bidirectional AC-DC converter for a dc distribution system” , IEEE Transactions on Power Electronics 28(4), pp.1642-2013
- [96] 김소연, “함정용 에너지 저장 시스템의 설계 및 함정 통합 전력계통의 전압/주파수 보상 운용” , 서울대학교 박사 학위 논문
- [97] Chun-Wei Lim, Chang-Yi Peng and Huang-Jen Chiu, “A novel three-phase six-switch pfc rectifier with zero-voltage-switching and zero-current-switching features” , Energies 2019, 12(6), pp.
- [98] Yasha Parvini and Ardalan Vahidi, “Maximizing charging efficiency of lithium-ion and lead-acid batteries using optimal control theory” , American Control Conference
- [99] Xiong Pu Mengmeng Liu Linxuan Li Chi Zhang Yaokun Pang Chunyan Jiang Lihua Shao Weiguo Hu, “Efficient charging of li-ion batteries with pulsed output current of triboelectric nanogenerators” , Advanced science, pp.1-7, DOI: 10.1002/advs.201500255
- [100] Hao Qian, Jianhui Zhang, Jih-Sheng, Wensong Yu, “A high-efficiency grid-tie battery energy storage system” , IEEE Transactions on Power Electronics 26(3), pp.886-896
- [101] Kuo-Yuan Lo, Yaow-Ming Chen, Yung-Ruei Chang, “Bidirectional single-stage grid-connected inverter for a battery energy storage system” , IEEE Transactions on Industrial Electronics 64(6), pp.4581-4590
- [102] G. Sulligoi, S. Castellan, M. Aizza, D. Bosisch, L. Piva, and G. Lipardi, “Active front-end for shaft power generation and voltage control in fremm frigates

- integrated power system: modelling and validation” , In Proceedings of the 21st International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, pp.452-457
- [103] O. J. Simmonds, “Advanced hybrid systems and new integration challenges” , in Proc. international naval engineering conference
- [104] R. D. Geertsma, R. R. Negenborn, K. Visser, and J. J. Hop-man, “Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments” , Applied Energy, Vol. 194, pp.30-54
- [105] Miralem HADŽISELIMOVIĆ, Ivan ZAGRADIŠNIK, Bojan ŠTUMBERGER, “Machine: comparison of motor and generator characteristics” , Przegląd Elektrotechniczny 89(2b), pp.103-106
- [106] Wim Deprez, Annick Dexters, Johan Driesen, Ronnie Belmans, “Energy efficiency of small induction machines: Comparison between motor and generator mode” , ICEM 2006(269), pp.1-6
- [107] R. Pena, J.C Clare, G.M Asher, “Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation” , Electric Power Applications 143(3), pp.231-241
- [108] Deng-Chern Sue, “High efficiency double-fed induction generator applied to wind power generator technical analyses” , Energy and Power Engineering, Vol.03(03), pp.253-261